# COURS DE FORMATION 1

# RADIOPROTECTION DANS LES HÔPITAUX

Direction de l'hygiène du milieu
Direction générale de la protection de la santé

Publication autorisée par le
Ministre de la Santé nationale et du Bien-être social

Février 1982

82-DHM-81

ON PEUT OBTENIR DES EXEMPLAIRES DU
PRÉSENT RAPPORT EN S'ADRESSANT À LA:

Direction de l'information
Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social
5e étage
Immeuble Brooke Claxton
OTTAWA K1A 0K9

Also available in English under the title:
"Training Manual I - Radiation Hazard Control in Hospitals"

## AVANT-PROPOS

Ce cours est destiné à la formation du personnel des hôpitaux appelé à travailler avec les sources les plus courantes de rayonnements ionisants. Une attention particulière est accordée aux règles essentielles de sécurité pour les utilisateurs de radio-isotopes et de rayons X.

Le docteur H.V. Denley, du Bureau de la radioprotection du ministère de la Santé nationale et du Bien-être social, s'est chargé de compiler les éléments du cours.

## TABLE DES MATIÈRES


| | | Page |
|---|---|---|
| 1. | STRUCTURE DE L'ATOME | 1 |
| 1.1 | Matière | 1 |
| 1.2 | Particules fondamentales | 1 |
| 1.3 | Structure | 1 |
| 1.3.1 | Couches électroniques | 1 |
| 1.3.2 | Numéro atomique | 2 |
| 1.3.3 | Nombre de masse | 4 |
| 1.4 | Isotopes | 4 |
| 1.5 | Nucléides | 5 |
| 2. | TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES ET NATURE DES RADIO-ISOTOPES | 6 |
| 2.1 | Particules alpha | 6 |
| 2.2 | Émission de neutrons | 6 |
| 2.3 | Particules bêta | 8 |
| 2.4 | Capture K | 9 |
| 2.5 | Rayonnement gamma | 9 |
| 2.6 | Production de radio-isotopes | 10 |
| 2.7 | Processus de désintégration radioactive | 11 |
| 3. | CARACTÉRISTIQUES DES RAYONNEMENTS | 14 |
| 3.1 | Introduction | 14 |
| 3.2 | Particules alpha | 14 |
| 3.3 | Particules bêta | 15 |
| 3.4 | Rayons X et rayons gamma | 15 |
| 3.5 | Spectre électromagnétique | 16 |
| 4. | NATURE ET PRODUCTION DES RAYONS X | 18 |
| 4.1 | Introduction | 18 |
| 4.2 | Production de rayons X | 19 |
| 4.2.1 | Rayons X continus | 20 |
| 4.2.2 | Rayons X caractéristiques | 20 |
| 5. | INTERACTION DES RAYONS X ET DES RAYONS GAMMA AVEC LA MATIÈRE | 22 |
| 5.1 | Introduction | 22 |
| 5.2 | Mécanismes d'interaction des rayons X et des rayons gamma | 22 |
| 5.2.1 | Effet Compton | 22 |
| 5.2.2 | Effet photoélectrique | 22 |
| 5.2.3 | Production de paires | 24 |
| 5.3 | Atténuation | 25 |
| 6. | UNITÉS UTILISÉES DANS LES TRAVAUX SUR LES RAYONNEMENTS | 27 |
| 6.1 | Unités de mesure de la radioactivité | 27 |
| 6.2 | Unités d'énergie de rayonnement | 27 |
| 6.3 | Unités de dose de rayonnement | 28 |

| | | Page |
|---|---|---|
| 7. | EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS | 30 |
| 7.1 | Introduction | 30 |
| 7.2 | Phénomènes intracellulaires | 30 |
| 7.3 | Effets somatiques des rayonnements | 32 |
| 7.4 | Effets génétiques des rayonnements | 33 |
| 7.5 | Courbes dose-effet | 33 |
| 7.6 | Exposition humaine aux rayonnements | 34 |
| 8. | UTILISATIONS MÉDICALES DES RADIO-ISOTOPES | 35 |
| 8.1 | Sources non scellées | 35 |
| 8.2 | Sources scellées | 36 |
| 9. | INSTALLATIONS DE LABORATOIRE POUR LA MANIPULATION DES RADIO-ISOTOPES | 37 |
| 9.1 | Introduction | 37 |
| 9.2 | Détails sur les types de laboratoires | 37 |
| 9.2.1 | Laboratoire à haut niveau d'activité | 37 |
| 9.2.2 | Laboratoire à niveau d'activité moyen | 38 |
| 9.2.3 | Laboratoire à bas niveau d'activité | 38 |
| 10. | RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR LA MANIPULATION DES RADIO-ISOTOPES | 42 |
| 10.1 | Introduction | 42 |
| 10.2 | Précautions générales | 42 |
| 10.3 | Entreposage et élimination des déchets | 43 |
| 10.4 | Accidents | 43 |
| 10.5 | Temps d'exposition | 43 |
| 10.6 | Distance | 44 |
| 10.7 | Écran protecteur | 44 |
| 10.8 | Sources scellées | 44 |
| 10.9 | Précautions générales pour la santé | 45 |
| 11. | RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR LES SOURCES SCELLÉES DE RAYONNEMENTS BÊTA ET GAMMA | 49 |
| 11.1 | Règles générales | 49 |
| 11.2 | Sources de rayonnements bêta | 49 |
| 11.3 | Sources de rayons gamma à usage médical | 50 |
| 11.3.1 | Thérapie avec des sources sans collimateur | 50 |
| 11.3.2 | Thérapie par faisceau (téléthérapie) | 51 |
| 12. | RÈGLES DE SÉCURITÉ APPLICABLES AUX INSTALLATIONS À RAYONS X | 53 |
| 12.1 | Règles générales | 53 |
| 12.2 | Dispositifs de radiodiagnostic médical | 55 |
| 12.3 | Installations de radiothérapie | 60 |
| 13. | PRINCIPES DE RADIODÉTECTION | 62 |
| 13.1 | Introduction | 62 |
| 13.2 | But des mesures | 62 |

| | | Page |
|---|---|---|
| 13.3 | Méthodes de mesure | 62 |
| 13.4 | Collection électrique des ions | 62 |
| 13.4.1 | Chambres d'ionisation | 63 |
| 13.4.2 | Tubes compteurs proportionnels | 64 |
| 13.4.3 | Tubes compteurs de Geiger-Mueller | 64 |
| 13.5 | Détection photographique | 65 |
| 13.6 | Scintillation des cristaux | 67 |
| 13.7 | Décomposition chimique | 68 |
| 13.8 | Détecteurs fluorescents et thermoluminescents | 69 |
| 13.8.1 | Dosimètres fluorescents | 69 |
| 13.8.2 | Dosimètres thermoluminescents | 69 |
| 13.9 | Détermination calorimétrique | 69 |
| 13.10 | Réactions nucléaires et de recul | 69 |
| 13.10.1 | Neutrons lents | 70 |
| 13.10.2 | Neutrons rapides | 70 |
| 14. | DOSIMÉTRIE INDIVIDUELLE | 72 |
| 14.1 | Introduction | 72 |
| 14.2 | Dosimétrie individuelle | 72 |
| 14.3 | Système de dosimétrie par thermoluminescence (DTL) | 73 |
| 14.3.1 | Thermoluminescence et courbes de luminescence | 73 |
| 14.3.2 | Dosimètres pour le corps entier et pour la peau | 74 |
| 14.4 | Comparaison des qualités dosimétriques du fluorure de lithium thermoluminescent et des films photographiques | 75 |
| 14.5 | Dosimètre de poche | 77 |
| 15. | PRINCIPES ET MATÉRIAUX UTILISÉS POUR RÉDUIRE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS | 79 |
| 15.1 | Temps | 79 |
| 15.2 | Distance | 79 |
| 15.3 | Écran protecteur | 79 |
| 15.3.1 | Facteurs à considérer dans le calcul des écrans pour des installations à rayons X et à rayons gamma | 80 |
| 15.3.2 | Matériaux protecteurs | 81 |
| 15.4 | Configurations des écrans de protection | 84 |
| 15.5 | Contrôle des rayonnements | 85 |
| 15.5.1 | Introduction | 85 |
| 15.5.2 | Surveillance individuelle | 85 |
| 15.5.3 | Surveillance de zone | 85 |
| 15.5.4 | Surveillance en des points fixes | 85 |
| 15.5.5 | Instruments de contrôle | 86 |
| 15.5.6 | Rapport de contrôle | 86 |
| | GLOSSAIRE TECHNIQUE | 87 |
| | ANNEXE | 93 |

## LISTE DES FIGURES


| | | Page |
|---|---|---|
| 1. | L'atome | 2 |
| 2. | Les atomes d'hydrogène et d'hélium | 2 |
| 3. | Les trois isotopes de l'hydrogène | 5 |
| 4. | Courbe de stabilité des nucléides | 7 |
| 5. | Courbe de désintégration radioactive | 13 |
| 6. | Spectre électromagnétique | 17 |
| 7. | Déplacement d'une onde | 17 |
| 8. | Tube anodique stationnaire | 18 |
| 9. | Spectre des rayons X | 19 |
| 10. | Production de rayons X continus | 20 |
| 11. | Production de rayons X caractéristiques | 21 |
| 12. | Effet Compton | 23 |
| 13. | Effet photoélectrique | 23 |
| 14. | Production de paires | 24 |
| 15. | Séquence des phénomènes intracellulaires | 31 |
| 16. | Courbe avec seuil | 33 |
| 17. | Courbe sans seuil | 33 |
| 18. | Chambre d'ionisation | 63 |
| 19. | Variation de l'amplitude de l'impulsion en fonction de la tension appliquée | 66 |
| 20. | Dosimètre de poche | 77 |

## LISTE DES TABLEAUX


| | | Page |
|---|---|---|
| 1. | Propriétés des particules fondamentales | 1 |
| 2. | Les éléments | 3 |
| 3. | Exemples de périodes radioactives | 12 |
| 4. | Épaisseurs approximatives des couches d'atténuation à la moitié (CDA) et au dixième (CAD) pour les écrans protecteurs | 26 |
| 5. | Types de laboratoires | 37 |
| 6. | Radionucléides de toxicité très élevée | 39 |
| 7. | Radionucléides de toxicité élevée | 39 |
| 8. | Radionucléides de toxicité moyenne | 40 |
| 9. | Radionucléides de faible toxicité | 41 |
| 10. | Constantes pour le plomb | 82 |
| 11. | Constantes pour le béton | 83 |
| 12. | Constantes pour le fer et l'acier | 83 |
| 13. | Propriétés protectrices des verres au plomb | 84 |

# 1. LA STRUCTURE DE L'ATOME

## 1.1 La matière

La matière existe soit sous forme d'éléments, soit sous forme d'une combinaison d'éléments. On connaît actuellement plus de cent éléments. Certains, parmi les plus lourds, ont été fabriqués par l'homme et n'existent pas dans la nature. La plus petite partie d'un élément est l'atome. Les atomes s'associent pour former des molécules. Les molécules peuvent être constituées d'atomes du même élément ou de deux ou plusieurs atomes différents (corps composés).

## 1.2 Les particules fondamentales

Dans ce cours, nous considérons que l'atome est constitué de trois sortes de particules: les protons, les neutrons et les électrons. Leurs symboles et leurs propriétés fondamentales sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau 1. Propriétés des particules fondamentales**

| Particule | Symbole | Masse relative | Charge électrique |
|---|---|---|---|
| Proton | p | 1* | + |
| Neutron | n | 1 | 0 |
| Électron | e | 1/1840 | |

*Masse d'un proton = $1{,}67243 \times 10^{-24}$ g

## 1.3 Structure

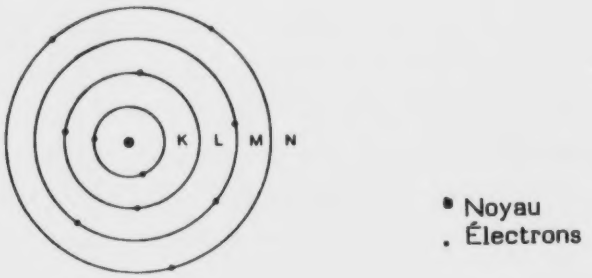
La partie centrale, très dense, de l'atome s'appelle le noyau. Le noyau est constitué de neutrons et de protons. Les électrons tournent autour du noyau, sur des orbites appelées couches électroniques. Une force électrostatique s'exerce entre le noyau, chargé positivement à cause des protons, et les électrons chargés négativement, qui tournent autour du noyau. Le nombre de protons dans le noyau est égal au nombre d'électrons sur les couches électroniques. La charge globale de l'atome est donc nulle.

### 1.3.1 Les couches électroniques

L'atome comporte deux restrictions: (1) le nombre de couches électroniques est limité, et (2) le nombre total d'électrons sur une couche est aussi limité.

On désigne les couches par les lettres K, L, M, N, etc., et les nombres correspondants d'électrons sur chaque couche sont respectivement 2, 8, 18, 32.

**Figure 1. L'atome**




L'atome le plus simple est l'atome d'hydrogène. Il possède un proton, et un électron sur la couche K. L'hélium a 2 protons et 2 neutrons, et sa couche K est saturée.

**Figure 2. Les atomes d'hydrogène et d'hélium**

1.3.2 Le numéro atomique

Les atomes de chaque élément possèdent un nombre défini de protons dans leurs noyaux. C'est ce nombre qui détermine la structure globale de l'atome, donc ses propriétés chimiques. Ce nombre est appelé le numéro atomique et est représenté par la lettre "Z".

Pour l'hydrogène, "Z" est égal à 1. Il est égal à 2 pour l'hélium. L'uranium, avec ses 92 protons, a un numéro atomique de 92. Le Tableau 2 donne le numéro atomique de tous les éléments connus.

**Tableau 2. Les éléments**

| Numéro atomique | Nom de l'élément | Symbole | Numéro atomique | Nom de l'élément | Symbole | Numéro atomique | Nom de l'élément | Symbole |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Hydrogène | H | 36. | Krypton | Kr | 70. | Ytterbium | Yb |
| 2. | Hélium | He | 37. | Rubidium | Rb | 71. | Lutetium | Lu |
| 3. | Lithium | Li | 38. | Strontium | Sr | 72. | Hafnium | Hf |
| 4. | Béryllium | Be | 39. | Yttrium | Y | 73. | Tantalum | Ta |
| 5. | Bore | B | 40. | Zirconium | Zr | 74. | Tungstène | W |
| 6. | Carbone | C | 41. | Niobium | Nb | 75. | Rhenium | Re |
| 7. | Azote | N | 42. | Molybdène | Mo | 76. | Osmium | Os |
| 8. | Oxygène | O | 43. | Technétium | Tc | 77. | Iridium | Ir |
| 9. | Fluor | F | 44. | Ruthénium | Ru | 78. | Platine | Pt |
| 10. | Néon | Ne | 45. | Rhodium | Rh | 79. | Or | Au |
| 11. | Sodium | Na | 46. | Palladium | Pd | 80. | Mercure | Hg |
| 12. | Magnésium | Mg | 47. | Argent | Ag | 81. | Thallium | Tl |
| 13. | Aluminium | Al | 48. | Cadmium | Cd | 82. | Plomb | Pb |
| 14. | Silicium | Si | 49. | Indium | In | 83. | Bismuth | Bi |
| 15. | Phosphore | P | 50. | Étain | Sn | 84. | Polonium | Po |
| 16. | Soufre | S | 51. | Antimoine | Sb | 85. | Astate | At |
| 17. | Chlore | Cl | 52. | Tellure | Te | 86. | Radon | Rn |
| 18. | Argon | Ar | 53. | Iode | I | 87. | Francium | Fr |
| 19. | Potassium | K | 54. | Xénon | Xe | 88. | Radium | Ra |
| 20. | Calcium | Ca | 55. | Césium | Cs | 89. | Actinium | Ac |
| 21. | Scandium | Sc | 56. | Barium | Ba | 90. | Thorium | Th |
| 22. | Titanium | Ti | 57. | Lanthane | La | 91. | Protactinium | Pa |
| 23. | Vanadium | V | 58. | Cérium | Ce | 92. | Uranium | U |
| 24. | Chrome | Cr | 59. | Praséodymium | Pr | 93. | Neptunium | Np |
| 25. | Manganèse | Mn | 60. | Néodymium | Nd | 94. | Plutonium | Pu |
| 26. | Fer | Fe | 61. | Prometheum | Pm | 95. | Americium | Am |
| 27. | Cobalt | Co | 62. | Samarium | Sm | 96. | Curium | Cm |
| 28. | Nickel | Ni | 63. | Europium | Eu | 97. | Berkelium | Bk |
| 29. | Cuivre | Cu | 64. | Gadolinium | Gd | 98. | Californium | Cf |
| 30. | Zinc | Zn | 65. | Terbium | Tb | 99. | Einsteinium | Es |
| 31. | Gallium | Ga | 66. | Dysprosium | Dy | 100. | Fermium | Fm |
| 32. | Germanium | Ge | 67. | Holmium | Ho | 101. | Mendélévium | Md |
| 33. | Arsenic | As | 68. | Erbium | Er | 102. | Nobelium | No |
| 34. | Sélénium | Se | 69. | Thulium | Tm | 103. | Lawrencium | Lr |
| 35. | Brome | Br | | | | | | |

### 1.3.3 Nombre de masse

Comme on peut le voir d'après les masses relatives des particules fondamentales, pratiquement toute la masse de l'atome est concentrée dans les protons et les neutrons. Celle des électrons est négligeable. La somme des nombres de protons et de neutrons est appelée le nombre de masse et est représentée par la lettre "A".

$$A = N + Z \text{ où } N \text{ est le nombre de neutrons}$$

Si l'on connaît le nombre de masse et le numéro atomique, on peut déterminer N à partir de:

$$N = A - Z$$

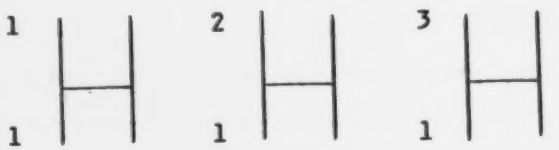
L'uranium a un nombre de masse de 238 et un numéro atomique de 92. Il possède donc 238 - 92 = 146 neutrons.

## 1.4 Les isotopes

Le nombre de neutrons par proton, dans un noyau, c'est-à-dire le rapport N/Z est égal à 1 dans les éléments les plus légers (excepté l'hydrogène). Ce rapport augmente lorsque Z devient plus élevé. Des forces nucléaires entre protons et neutrons permettent la cohésion du noyau. Le noyau d'un élément donné possède un nombre caractéristique de protons. Il faut un certain nombre de neutrons pour que les forces nucléaires d'attraction équilibrent les forces de répulsion entre protons. Un rapport N/Z égal à 1, assure une stabilité maximale, mais le nombre de neutrons peut varier légèrement. Il est donc possible d'avoir des atomes avec le même Z, mais avec des nombres N légèrement différents. Leur nombre de masse A est alors différent. De tels atomes d'un même élément, qui n'ont pas la même masse atomique (ou nombre de masse) s'appellent des isotopes.

Comme on l'a vu, l'atome commun d'hydrogène a seulement un proton dans son noyau. Il existe cependant d'autres formes d'hydrogène. Le noyau d'un atome plus lourd, appelé deutérium, possède un neutron en plus du proton. Cet atome a un numéro atomique de 1, mais un nombre de masse de 2. L'hydrogène et le deutérium sont des isotopes du même élément. On connaît aussi un atome dont le noyau contient deux neutrons. C'est le tritium, dont le nombre de masse est 3.

**Figure 3. Les trois isotopes de l'hydrogène**




Hydrogène Deutérium Tritium

De nombreux éléments ont plus d'un isotope naturel. Contrairement aux isotopes de l'hydrogène, les isotopes des autres éléments n'ont pas de nom particulier, ils sont identifiés par leur nombre de masse. Par exemple, l'uranium-235 et l'uranium-238. Le dernier contient 3 neutrons de plus par atome. Les symboles complets de ces isotopes sont respectivement $^{235}_{92}U$ et $^{238}_{92}U$. Ces symboles donnent des renseignements sur Z et A, donc sur N.

Sauf pour les éléments très légers, comme l'hydrogène, les isotopes d'un élément se comportent de façon pratiquement identique. Il est donc assez difficile de les séparer par des moyens physiques et chimiques ordinaires. Même pour l'hydrogène, les procédés de séparation sont compliqués, bien que les différences entre l'eau lourde et l'eau normale soient facilement mesurables.

## 1.5 Les nucléides

Le terme nucléide désigne tous les différents types d'atomes. Un nucléide est un type d'atome spécifique, caractérisé par la constitution du noyau, c'est-à-dire par les nombres de neutrons et de protons. La plupart des 90 éléments naturels possèdent deux isotopes ou plus. Il existe donc plus de 300 nucléides naturels. L'instabilité d'un radionucléide est due à sa configuration nucléaire. Les radionucléides ont tendance à se désintégrer en nucléides non radioactifs plus stables, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

## 2. TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES ET NATURE DES RADIO-ISOTOPES

### 2.1 Les particules alpha

Lorsqu'on trace le graphique du nombre de neutrons de tous les nucléides naturels en fonction de leur numéro atomique, on obtient une courbe régulière se terminant avec les nucléides de l'uranium, l'élément le plus lourd (voir la Figure 4). Presque tous les éléments naturels dont le numéro atomique est supérieur à 80, et quelques-uns de numéro atomique inférieur, ont des isotopes instables. À cause de la taille des noyaux, les forces nucléaires qui assurent la cohésion ne suffisent pas à combattre les forces de répulsion entre les nombreux protons chargés positivement. Ces nucléides lourds subissent donc des transformations nucléaires qui modifient les nombres de protons et de neutrons. On appelle ce processus "désintégration radioactive" ou "radioactivité". L'ensemble de deux protons et de deux neutrons étant particulièrement stable, il est souvent éjecté comme une particule unitaire. Ce groupe, identique au noyau d'un atome d'hélium, est projeté avec une vitesse extrêmement élevée. On l'appelle particule alpha (particule $\alpha$). Le nucléide restant est un atome d'un élément dont le numéro atomique et le nombre de masse sont respectivement inférieurs de 2 et de 4 unités. Le radium, de numéro atomique 88 et de nombre de masse 226, est donc transformé en radon avec Z = 86 et A = 222 ou:

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He + Q$$

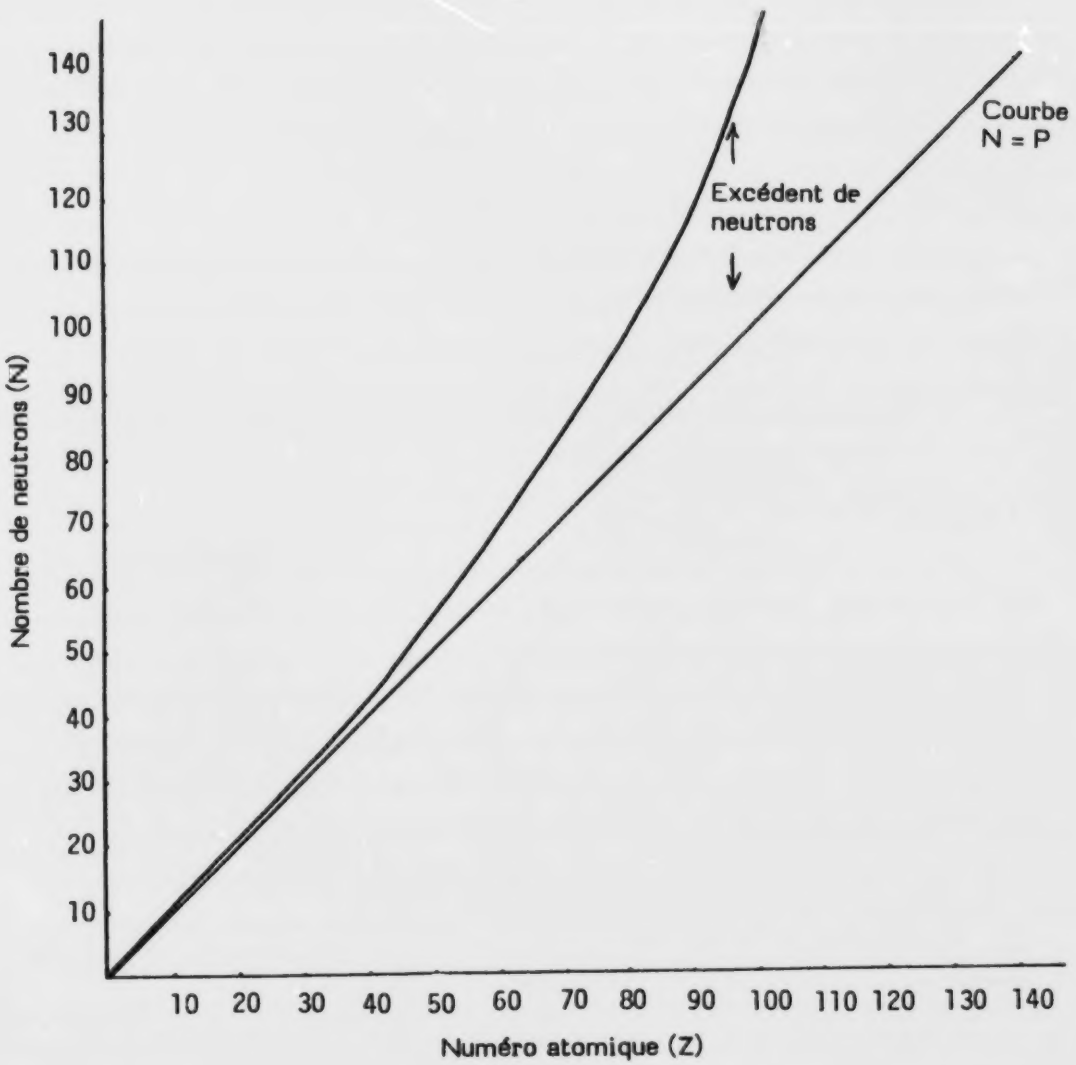
L'expression ci-dessus est une équation de réaction nucléaire. Elle montre la transformation radioactive d'un élément en un autre. Dans le cas présent, Ra est le père nucléaire, et Rn est le produit de désintégration ou descendant. Q représente l'énergie libérée sous forme d'énergie cinétique (particules alpha).

Habituellement, pour les éléments les plus lourds, une seule transformation ne suffit pas à les rendre stables. Le processus continue donc en une chaîne de transformations nucléaires. Il y a production d'une série de nucléides radioactifs, de Z, N et A décroissants, qui se termine par un élément stable, beaucoup plus léger.

### 2.2 Émission de neutrons

Indépendamment de la désintégration radioactive au cours de laquelle des particules alpha sont émises, on peut provoquer la fragmentation de nombreux atomes, parmi les plus lourds. Cet éclatement d'un gros atome, généralement en deux

**Figure 4. Courbe de stabilité des nucléides**



fragments lourds, s'appelle la "fission". La méthode la plus courante pour briser un nucléide lourd consiste à le bombarder avec un neutron. Au cours de la fission, d'autres neutrons sont libérés.

On peut produire des neutrons autrement que par fission. Fondamentalement, la seule façon d'obtenir des neutrons consiste à les éjecter du noyau. On peut le faire soit en envoyant un rayonnement gamma sur le nucléide (augmentant ainsi l'énergie de ce dernier), soit en le bombardant avec des projectiles appropriés. L'équation suivante est un exemple du premier type de réaction, appelée réaction photonucléaire:

$$^{9}_{4}Be + \gamma \longrightarrow {}^{8}_{4}Be + {}^{1}_{0}n + Q$$

où $\gamma$ est un rayon gamma énergétique et $^{1}_{0}n$ est le symbole du neutron.

Lorsque des particules réagissent avec certaines substances, comme le béryllium, des neutrons sont libérés selon l'équation suivante:

$$^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \text{ (particules } \alpha) \longrightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n + Q$$

Ces sources de neutrons sont préparées en mélangeant du radium et du béryllium. Le radium fournit les particules $\alpha$.

## 2.3 Particules bêta

Comme on peut le voir à la Figure 4, le rapport N/Z est un facteur important de stabilité nuclaire. Si, par des moyens artificiels, on peut produire un nucléide avec un excédent de neutrons ou de protons, ce nucléide aura tendance à se transformer jusqu'à ce que le rapport N/Z approche l'unité. Pour mieux comprendre ce processus, il faut examiner les propriétés du neutron. Par sa masse, cette particule se compare au proton. En fait, le neutron est légèrement plus lourd. De plus, un neutron libre peut se changer spontanément en un proton et un électron de la façon suivante:

$$^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + e^{-} + Q$$

où p est un proton, $e^{-}$ est un électron, et Q est un neutrino possédant de l'énergie cinétique.

Normalement, les neutrons ne subissent pas une telle désintégration radioactive lorsqu'ils sont liés dans un nucléide. Cependant, si un nucléide est rendu instable à cause d'un trop grand nombre de neutrons, il se transformera spontanément, convertissant un neutron en un proton et éjectant un électron. Ces électrons éjectés, dont la vitesse est proche de celle de la lumière, sont appelés "particules bêta"

(particules β). Ces transformations peuvent se poursuivre jusqu'à ce que le nucléide résultant ait une valeur de N/Z voisine de l'unité.

À chaque émission bêta, le nucléide perd un neutron, mais gagne un proton. Il y a donc accroissement du numéro atomique par 1 unité, sans changement du nombre de masse, comme le montre l'exemple suivant:

$$^{214}_{82}Pb \longrightarrow {}^{214}_{83}Bi + e^- + Q$$

## 2.4 Capture K

Ainsi, si un nucléide obtenu artificiellement a un excédent de protons, il aura tendance à transformer un proton en un neutron. Pour ce faire, le noyau peut capturer l'un des électrons orbitaux. On appelle ce processus "capture K" car c'est un électron de la courbe K qui est capturé. Cette forme de radioactivité ne produit pas de particule, mais il y a libération d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, dû au remplissage, par les autres électrons, des orbites laissées vacantes. Dans ce type de transformation, le descendant a un numéro atomique inférieur de 1 à celui du père nucléaire.

$$^{1}_{1}P + e^- \longrightarrow {}^{1}_{0}n + Q$$

## 2.5 Rayonnement gamma

Dans toutes les équations représentant des réactions nucléaires, il faut introduire un terme "Q", afin d'équilibrer les deux membres. Q représente l'énergie libérée par la réaction. Cette énergie se manifeste sous forme d'énergie cinétique transportée par des particules rapides et par les atomes de recul d'un descendant, ou sous forme d'excédent d'énergie transporté par un neutrino.

De nombreuses transformations radioactives laissent le noyau du descendant dans un "état excité". Ces noyaux reviennent à leur état fondamental en émettant un rayonnement électromagnétique appelé "rayonnement gamma". L'émission de rayons gamma est donc un effet secondaire d'une transformation nucléaire. Les rayons gamma ainsi émis ont des énergies discrètes, caractéristiques du descendant, correspondant à la différence d'énergie entre les deux états du noyau, après la première désintégration.

## 2.6 Production de radio-isotopes

On peut obtenir des noyaux radioactifs par:

1. Éclatement de gros atomes;
2. Modification du rapport N/Z de nucléides stables.

On a déjà mentionné la première réaction (fission): lorsqu'un atome lourd, comme l'uranium, se divise en deux fragments, chaque fragment a un rapport N/Z très proche de celui de l'uranium. Ils possèdent donc beaucoup plus de neutrons que le nucléide stable de même numéro atomique. Afin de corriger cette situation, le nucléide peut d'abord perdre des neutrons, mais il subit ensuite des désintégrations radioactives successives avec émission β. Lors de la fission, l'atome d'uranium se divise de plusieurs façons, produisant un grand nombre de fragments riches en neutrons. Un réacteur nucléaire dans lequel on peut commander la fission de l'uranium est donc une très bonne source d'isotopes radioactifs.

La deuxième méthode, la modification du rapport N/Z d'un nucléide consiste à bombarder le nucléide avec des projectiles comme des particules α, des protons, des neutrons, etc. Néanmoins, le noyau étant chargé positivement, des particules comme des protons ou des particules α, chargées elles-mêmes positivement, seront fortement repoussées. De telles réactions se produiront donc seulement si le proton ou d'autres particules chargées possèdent une très grande énergie (il faut les accélérer).

Si, par contre, on utilise le neutron comme projectile, il ne sera pas repoussé par le noyau puisqu'il n'est pas chargé. Lorsqu'une substance est exposée à un faisceau de neutrons, on s'attend à ce que des noyaux soient frappés par des neutrons. À la suite de ces chocs, le noyau cible peut capter des neutrons. Une vitesse peu élevée des neutrons facilite cette capture. Ces neutrons se déplaçant lentement sont appelés neutrons thermiques. La capacité de capture des noyaux varie beaucoup selon les substances. Lorsqu'un nucléide capture facilement des neutrons, on dit qu'il possède une section efficace de capture élevée.

Après avoir capturé des neutrons, les nucléides peuvent avoir un rapport N/Z supérieur à celui correspondant à la stabilité. Il est donc probable qu'ils soient radioactifs et qu'ils se désintègrent avec émission des particules α. Cette façon de rendre une substance radioactive est la méthode la plus couramment employée pour

produire des isotopes. On peut noter une réaction de capture de neutrons de la manière suivante:

$$^{59}_{27}Co + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{60}_{27}Co + Q$$

2.7 Le processus de désintégration radioactive

Les noyaux radioactifs ayant tendance à se désintégrer pour adopter des états stables, il est évident que la quantité de radioactivité va diminuer constamment. Il a été prouvé expérimentalement que le taux de diminution est caractéristique du radio-nucléide et qu'il ne peut être changé par aucun moyen chimique ou physique. On appelle "période radioactive" d'un radio-isotope le temps nécessaire pour que la moitié du nombre (quel qu'il soit) de noyaux radioactifs se désintègrent. Supposons, par exemple, que l'on ait mille atomes d'une certaine substance radioactive dont la période est de dix minutes. Après dix minutes, il restera seulement 500 atomes radioactifs. Au cours des dix minutes suivantes, la moitié de ces 500 atomes se désintégreront et il en restera 250. Le processus se poursuivra, et après quatre périodes, 1/16 des atomes initiaux seront radioactifs. La Figure 5 est une représentation graphique de ce processus: la courbe est exponentielle. Mathématiquement, le nombre d'atomes ($\Delta$ N) se désintégrant pendant un intervalle de temps donné ($\Delta$ t) est proportionnel au nombre "N" d'atomes radioactifs présents.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = - \lambda N$$

où "$\lambda$" est la constante de proportionnalité appelée "constante de désintégration". L'intégration de cette équation donne:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

où $N_0$ est le nombre total d'atomes présents au temps "t" = 0 et N est le nombre d'atomes au temps "t".

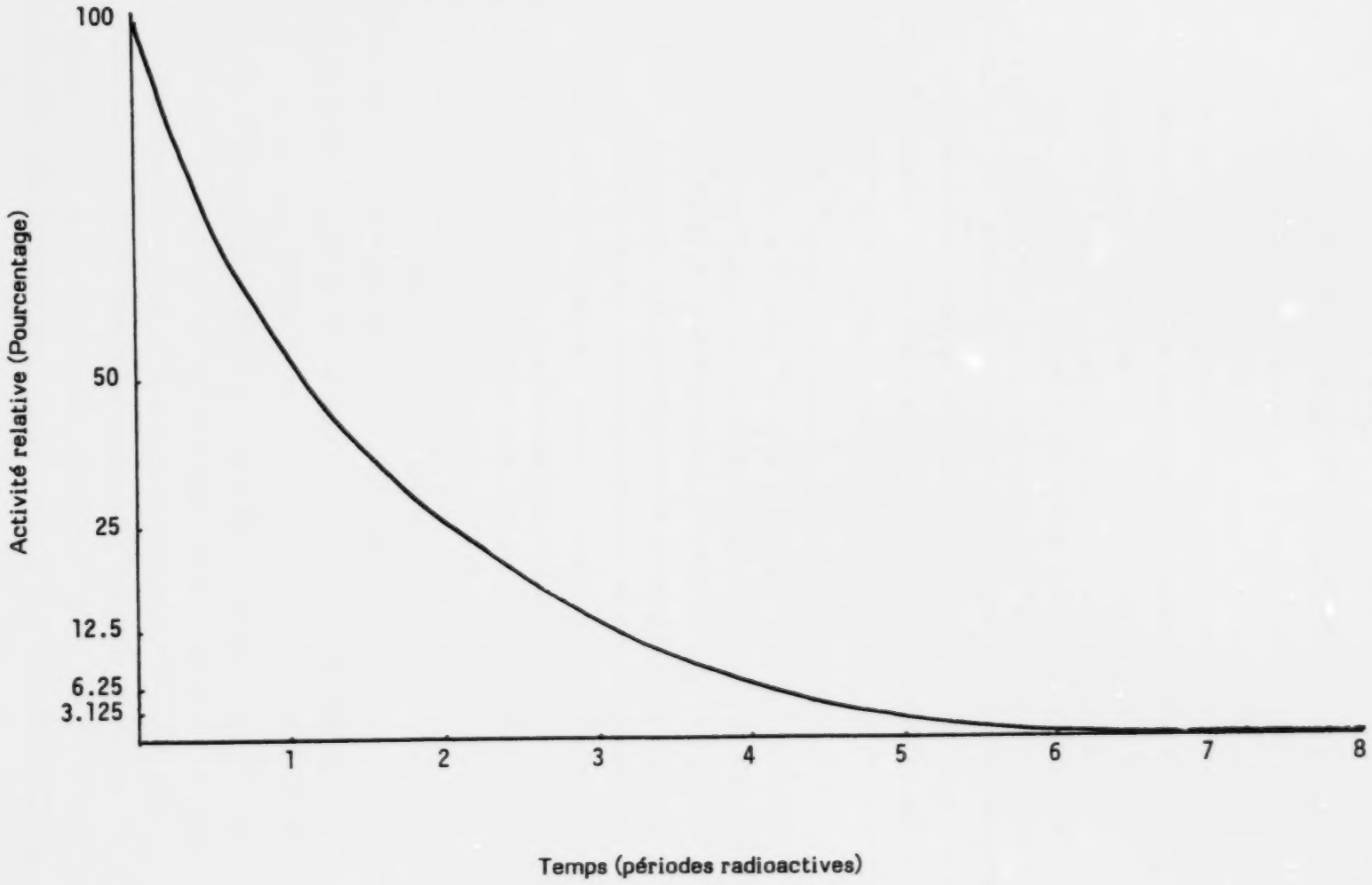
L'équation étant exponentielle, le graphique du rapport $N/N_0$ en fonction du temps, tracé sur papier semi-logarithmique, donnera une ligne droite. L'équation ci-dessus est valable pour tous les processus de désintégration radioactive.

La période des isotopes radioactifs peut varier entre $10^{-6}$ secondes et des milliards d'années. Le Tableau 3 donne plusieurs exemples.

**Tableau 3. Exemples de périodes radioactives**

| Radio-nucléide | Période | Masse équivalente à 1 curie |
|---|---|---|
| Azote-16 ($^{16}N$) | 7,3 secondes | $1 \times 10^{-11}$ grammes |
| Strontium-90 ($^{90}Sr$) | 19,9 années | $7 \times 10^{-3}$ grammes |
| Radium-226 ($^{226}Ra$) | 1622 années | 1 gramme |
| Uranium-238 ($^{238}U$) | $4,49 \times 10^{9}$ années | $3 \times 10^{6}$ grammes |

Figure 5. Courbe de désintégration radioactive



# 3. CARACTÉRISTIQUES DES RAYONNEMENTS

## 3.1 Introduction

Les rayons $\alpha$, $\beta$, et $\gamma$ constituent les types les plus courants de rayonnement émis lors d'une transformation radioactive. Tous ces rayonnements ont des interactions différentes avec la matière qu'ils traversent. Cependant, dans chaque cas, l'effet le plus important est l'ionisation. Quand un atome perd un électron, il devient chargé positivement. Un atome chargé s'appelle un "ion". L'électron arraché est négatif. On appelle "ionisation" le processus par lequel une paire d'ions est créée.

$$A \longrightarrow A^+ + e^-$$

## 3.2 Les particules alpha

Les plus lourds des rayonnements ionisants courants sont les particules alpha.

Lorsqu'elles traversent la matière, les particules alpha sont hautement ionisantes à cause de leur charge et de leur quantité de mouvement. Cela revêt une importance particulière lorsque ces particules frappent des cellules vivantes. Un point rassurant au sujet des particules alpha, en matière de santé et de sécurité, est qu'elles constituent le rayonnement le moins pénétrant de tous ceux que l'on rencontre couramment. Quelques centimètres d'air ou une fine feuille de papier suffisent pour absorber complètement ces particules. Le parcours dans la matière d'une particule alpha est proportionnel à son énergie ou à sa vitesse. La fourchette des énergies des particules alpha courantes est de 4 à 9 MeV. Voici quelques exemples pris dans la série de l'uranium:

| | |
|---|---|
| U-238 | 4200 MeV |
| Rh-222 | 5486 MeV |

L'énergie des particules alpha émises par un radionucléide donné est caractéristique de cet isotope.

Lorsque des particules alpha, chargées positivement, traversent un gaz ou l'air, elles arrachent les électrons faiblement liés des atomes de gaz, créant ainsi des paires d'ions. La création d'une paire d'ions nécessite environ 35 électrons-volts. Donc, sur son chemin, la particule alpha ionise le gaz et perd de l'énergie. Lorsque la particule est ralentie, elle passe plus de temps auprès de chaque atome, ce qui augmente les chances d'ionisation. Donc, l'intensité de l'ionisation augmente lorsque la vitesse de la

particule alpha diminue. L'ionisation spécifique croît rapidement pour finalement devenir nulle lorsque la particule s'arrête. Une fois arrêtée, la particule capture deux électrons pour former un atome d'hélium. On appelle "parcours" de la particule alpha la distance parcourue dans l'air avant que la particule s'arrête. Sur le parcours d'une particule alpha de 7,68 MeV, il se forme environ 220 000 paires d'ions.

## 3.3 Les particules bêta

Les particules bêta sont des électrons animés d'une très grande vitesse, émis au cours d'une désintégration radioactive. Leur vitesse est proche de celle de la lumière. Leur spectre d'énergie est continu, allant de zéro à une valeur maximale $E_{max}$. Cette valeur maximale est caractéristique d'un isotope particulier. Les particules bêta sont absorbées par quelques millimètres d'aluminium ou d'une substance similaire. Elles parcourent plusieurs centaines de centimètres dans l'air avant de dépenser leur énergie.

Les particules bêta peuvent être dispersées hors d'un faisceau à la suite de collisions avec d'autres électrons, ou bien elles peuvent subir une série de collisions élastiques et transférer une grande partie de leur énergie à la substance absorbante.

L'interaction des particules bêta avec le champ électrique d'un noyau ou avec les électrons d'un atome peut ralentir les particules. Lorsque cela se produit, une partie de l'énergie de la particule se transforme en rayonnement X. Ce rayonnement a un spectre continu et est appelé rayonnement de freinage. L'énergie maximale des rayons X produits est égale à l'énergie maximale des particules bêta. Elle correspond à l'énergie cinétique totale perdue par les électrons en une seule interaction.

La quantité d'énergie perdue au profit du rayonnement de freinage représente généralement un faible pourcentage seulement de l'énergie des particules, mais elle est proportionnelle à cette énergie et au numéro atomique de l'absorbant.

La fourchette des énergies des particules bêta est de 18 KeV pour le tritium à 4,81 pour Cl-38. Lorsqu'on parle de l'énergie des particules bêta, il s'agit toujours de l'énergie maximale.

## 3.4 Rayons X et rayons gamma

Deux types de rayonnements sont émis par les substances radioactives: des particules et des rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements alpha et bêta sont des particules, et les rayonnements X et gamma sont des rayonnements électro-

magnétiques. Les rayonnements électromagnétiques peuvent être assimilés à des paquets d'énergie ou "photons". Chaque photon transporte une quantité spécifique d'énergie (quantum). Les rayonnements X et gamma ont des énergies identiques, mais ils diffèrent quant à leur origine. Ils seront présentés plus en détail dans des chapitres suivants.

## 3.5 Spectre électromagnétique

La lumière visible, les ondes radioélectriques, l'infrarouge et l'ultraviolet constituent d'autres types de rayonnements électromagnétiques. Comme on peut le voir sur la Figure 6, il existe une différence d'énergie considérable entre les rayonnements X ou gamma, de grande énergie, et les ondes radioélectriques de faible énergie.

Il est utile de considérer un rayonnement électromagnétique comme une onde (voir la Figure 7). Cela s'applique plus aux photons présents en très grand nombre comme dans la lumière visible, qu'aux photons individuels de très haute énergie (rayons gamma).

La distance entre deux crêtes ou deux creux s'appelle la longueur d'onde ($\lambda$).

Tous les rayonnements voyagent dans le vide avec la même vitesse, quelle que soit leur longueur d'onde. Cette vitesse est égale à $3 \times 10^{10}$ cm/s.

La fréquence est le nombre d'ondes passant en un point donné par seconde. La relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse est donnée par l'équation:

$$c = \lambda\gamma$$

où c = vitesse, $\lambda$ = longueur d'onde, $\gamma$ = fréquence.

L'énergie des rayonnements électromagnétiques est transportée en petits paquets ou photons. La quantité d'énergie dans chaque photon est directement liée à la fréquence, comme le montre l'équation suivante:

$$E = h\gamma$$

où "h" est une constante pour tous les rayonnements électromagnétiques, appelée constante de Planck.

**Figure 6. Spectre électromagnétique**

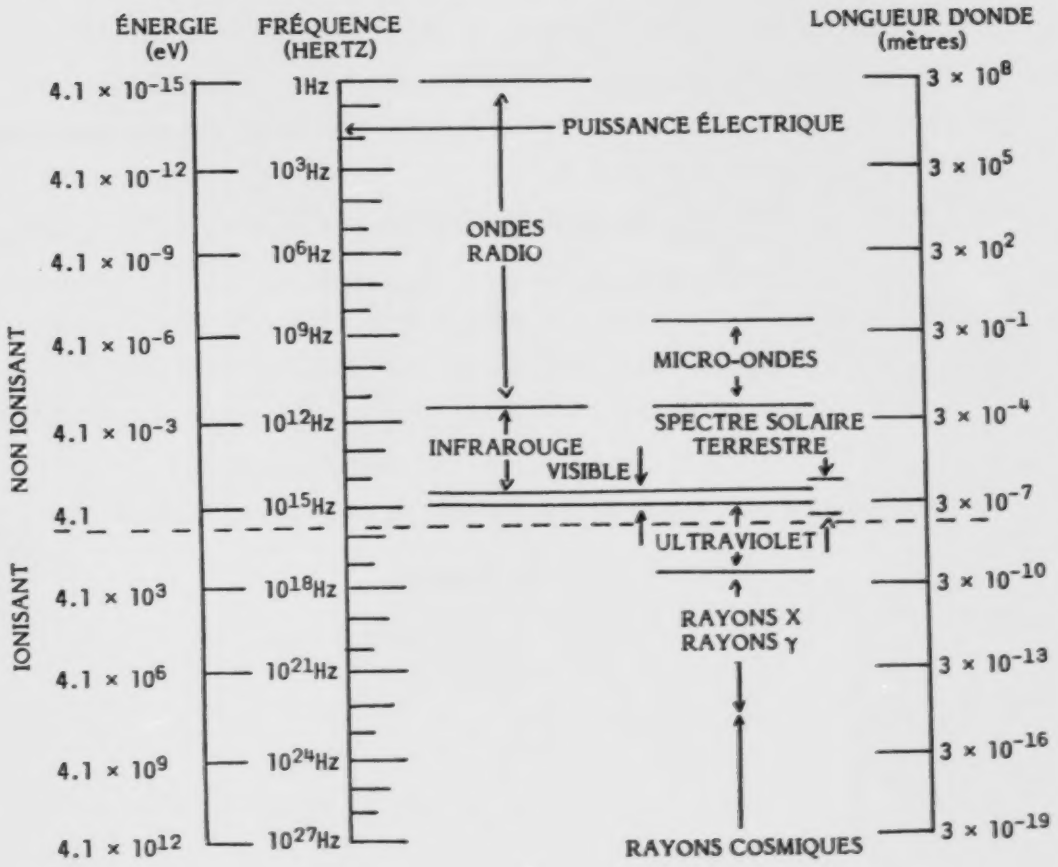
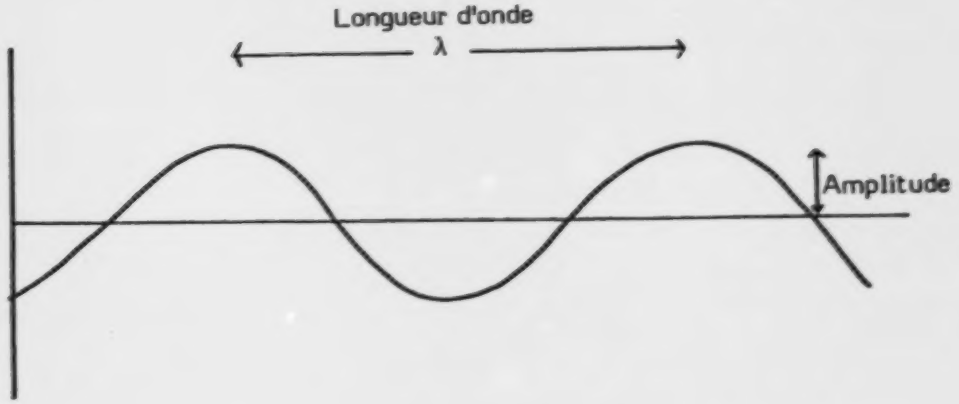



**Figure 7. Déplacement d'une onde**



# 4. NATURE ET PRODUCTION DES RAYONS X

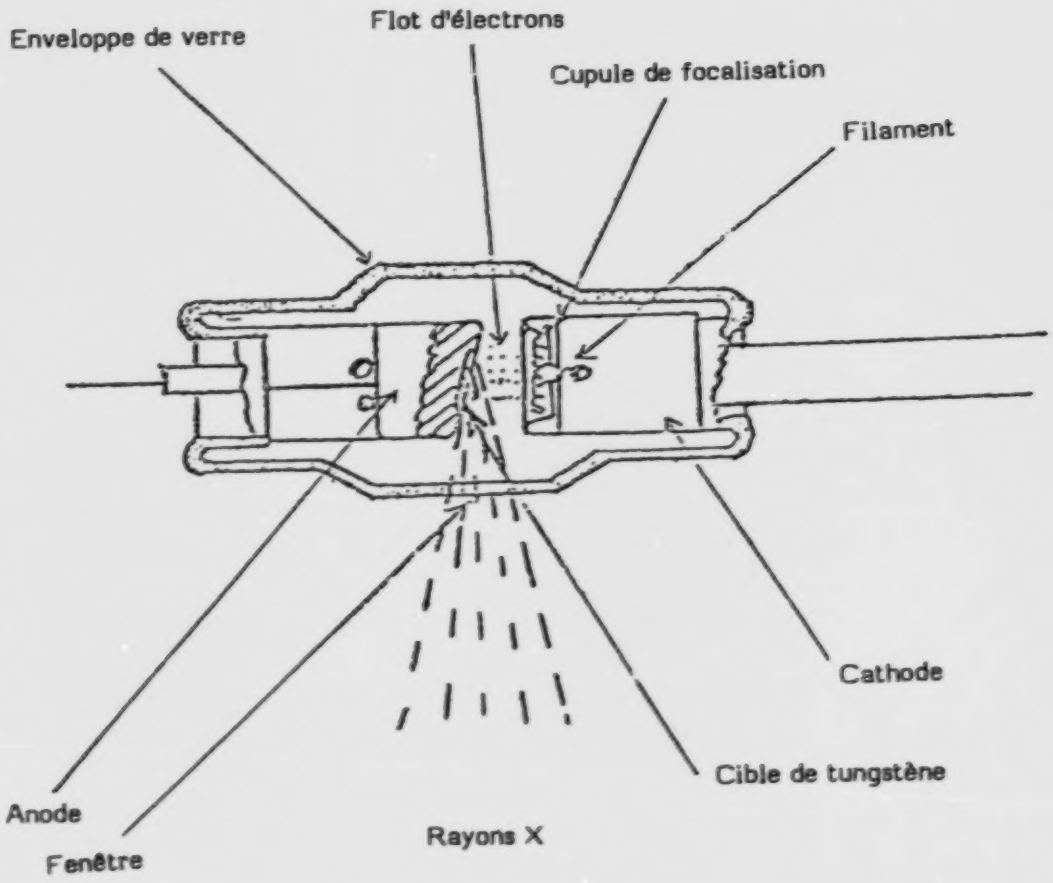
## 4.1 Introduction

Il y a émission de rayons X lorsque des électrons animés d'une grande vitesse bombardent une cible constituée d'atomes d'un élément lourd, comme le tungstène, sous forme solide.

Les principales composantes d'un tube à rayons X sont:

(i) une source d'électrons appelée filament ou cathode;
(ii) une atmosphère raréfiée dans laquelle les électrons sont accélérés;
(iii) un potentiel positif élevé pour accélérer les électrons; et
(iv) une cible, ou anode, que les électrons frappent, pour produire des rayons X (Figure 8).

**Figure 8. Tube anodique stationnaire**



La température du filament, ou cathode, détermine le nombre d'électrons qui seront accélérés vers l'anode, et la tension d'accélération, appelée tension de crête (kVc) détermine l'énergie maximale du rayonnement X produit.

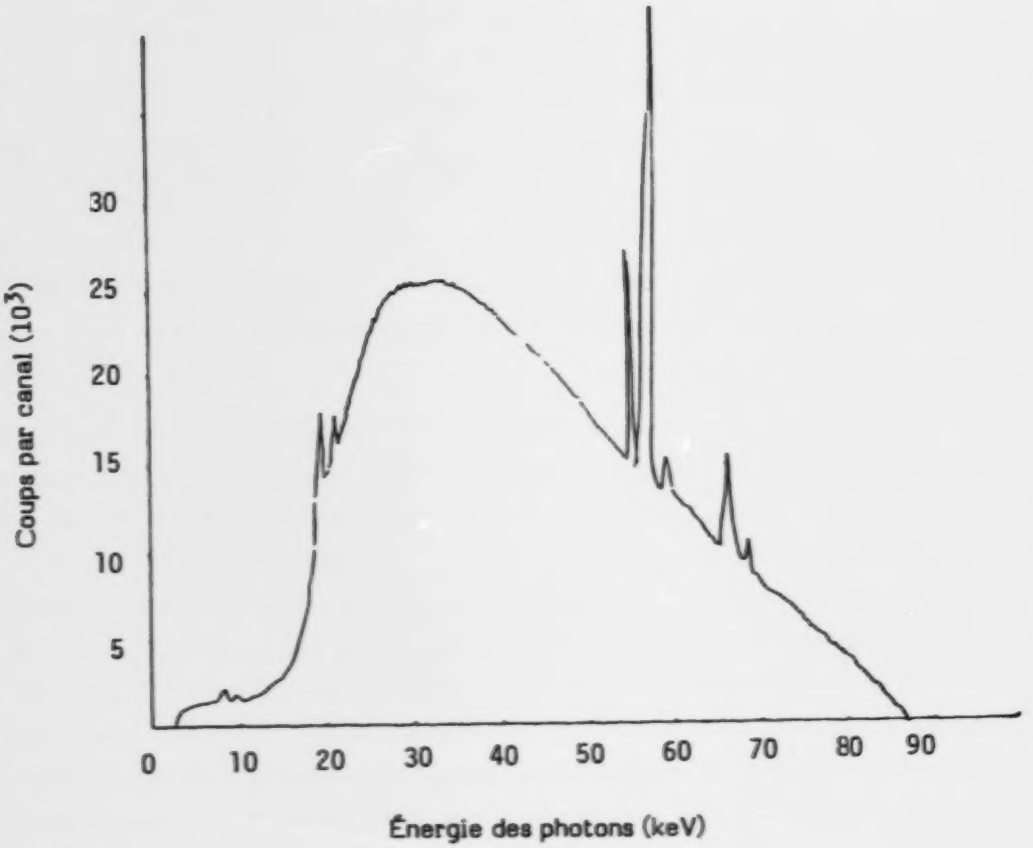
L'intensité du faisceau des rayons X produit lors du bombardement de l'anode par les électrons dépend de la nature de la cible. La production de rayons X est plus efficace lorsque le numéro atomique (Z) de la cible est élevé. La substance choisie doit aussi avoir un haut point de fusion car il y a dégagement de chaleur lorsque les électrons sont arrêtés à la surface de la cible.

Presque tous les tubes à rayons X modernes ont une cible en tungstène. Le tungstène a un numéro atomique de 74 et un point de fusion de 3400°C.

## 4.2 Production de rayons X

La plupart des électrons qui frappent la cible voient leur énergie dissipée sous forme de chaleur. Néanmoins, certains produisent un rayonnement X utile.

**Figure 9. Spectre des rayons X**

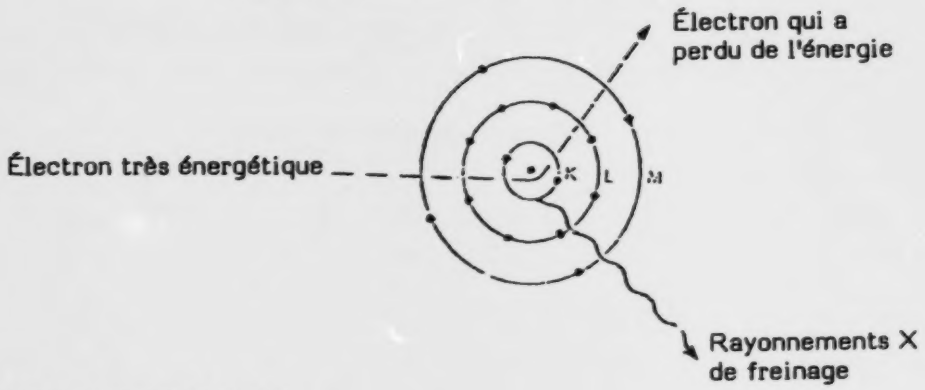


La Figure 9 montre le spectre des rayons X produits par un tube moderne. La grande partie lisse de la courbe correspond au rayonnement de freinage (spectre continu) et les pics représentent les rayons X caractéristiques (spectre de raies).

4.2.1 Rayons X continus (spectre continu)

Des rayons X continus sont émis lorsque des électrons animés d'une grande vitesse sont brusquement freinés à leur arrivée dans le champ électrique intense du noyau. En décélérant, les électrons libèrent de l'énergie. Cette énergie est émise sous forme de rayons X appelés rayonnement de freinage ou rayonnement continu. Si un grand nombre d'électrons sont en jeu, l'énergie rayonnée a un spectre identique à celui de la Figure 9.

**Figure 10. Production de rayons X continus**

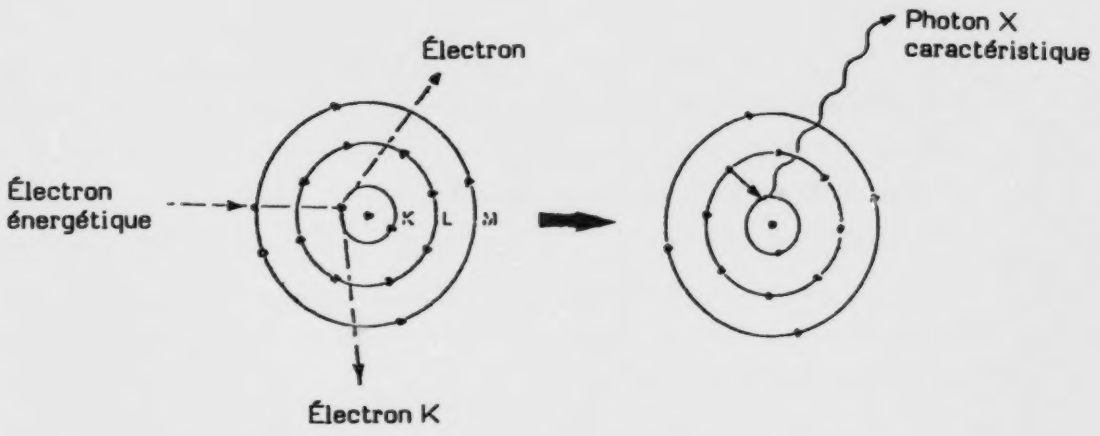



4.2.2 Rayons X caractéristiques

Le rayonnement X caractéristique apparaît dans le spectre sous la forme de pics qui se superposent au spectre continu. Ces pics, ou raies, caractérisent l'élément utilisé comme cible dans le tube à rayons X.

Il y a interaction entre un électron K de l'atome cible et un photon de rayonnement de freinage ou un électron incident. L'électron K est éjecté de son orbite et libéré. La place laissée vacante sur la couche K est immédiatement occupée par un électron provenant d'une couche extérieure. Il y a donc émission d'un photon X caractéristique, dont l'énergie est égale à la différence entre les niveaux d'énergie L et K. Un photon X peut aussi être émis lorsqu'un électron tombe du niveau L au niveau K, ou de la couche M à la couche K. L'énergie des électrons sur les différentes couches étant fixée de façon précise, la chute d'un électron d'une couche extérieure à une couche intérieure s'accompagne toujours d'un rayonnement X dont l'énergie est caractéristique de l'atome et correspond à la différence entre les énergies orbitales.

**Figure 11. Production de rayons X caractéristiques**



# 5. INTERACTION DES RAYONS X ET DES RAYONS GAMMA AVEC LA MATIÈRE

## 5.1 Introduction

Le comportement d'un rayonnement électromagnétique dépend de sa longueur d'onde. Lorsqu'un rayonnement de grande longueur d'onde, comme la lumière ou la chaleur, frappe de la matière, il peut être partiellement réfléchi, ou bien son énergie peut se dissiper entièrement sous forme de chaleur. Les rayons X et les rayons gamma ont des longueurs d'onde beaucoup plus courtes, et ils sont donc très pénétrants.

Les rayons X sont absorbés différemment suivant les matériaux. Des éléments lourds comme le calcium absorbent mieux les rayons X que des éléments légers comme le carbone, l'hydrogène et l'oxygène.

L'atténuation d'un rayonnement X est la réduction de son intensité due à l'absorption et à la diffusion de certains photons en dehors du faisceau.

## 5.2 Mécanismes d'interaction des rayons X et des rayons gamma

Il y a 3 formes d'interactions des rayons X et des rayons gamma avec des atomes.

### 5.2.1 L'effet Compton

Il y a interaction entre un photon incident et un électron "libre". Le photon transfère une partie de son énergie à l'électron (électron de recul) et est diffusé. Un électron est dit "libre" lorsque l'énergie du photon incident est considérablement plus grande que l'énergie de liaison de l'électron (électron faiblement lié).

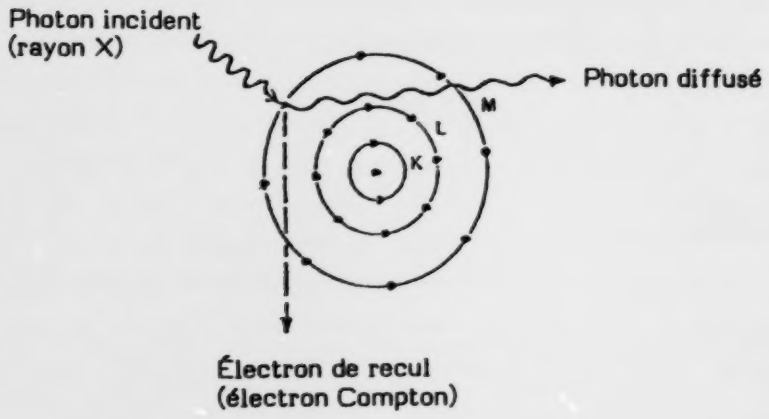
Le photon diffusé a une énergie plus faible (donc une plus grande longueur d'onde) que celle du photon incident. L'électron de recul absorbe la différence d'énergie entre le photon incident et le photon diffusé et est éjecté. On appelle cet électron un électron Compton.

### 5.2.2 L'effet photoélectrique

Le photon entre en collision avec un électron orbital et lui transfère toute son énergie. L'électron est alors éjecté hors de l'atome.

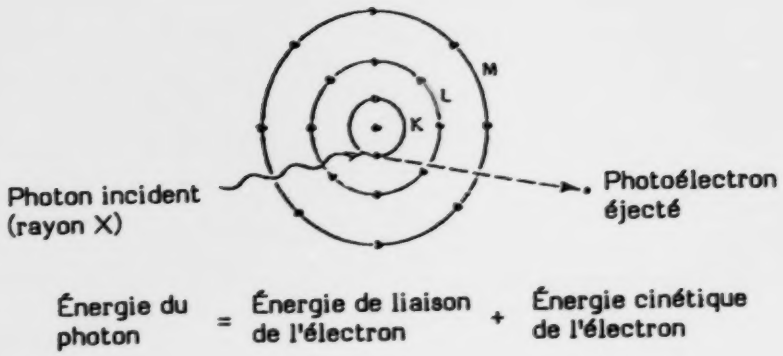
Si le photon a une énergie supérieure à celle nécessaire pour éjecter l'électron de l'atome, l'excédent d'énergie est transmis à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Ce phénomène s'appelle l'effet photoélectrique, et les électrons éjectés sont des photoélectrons. Toute l'énergie du photon incident est absorbée.

**Figure 12. Effet Compton**




Énergie du photon = Énergie du photon diffusé + Énergie de l'électron de recul

**Figure 13. Effet photoélectrique**




Énergie du photon = Énergie de liaison de l'électron + Énergie cinétique de l'électron

L'éjection d'un électron hors d'une couche électronique laisse une place vacante. Cette place est remplie par un électron d'une autre couche, avec émission d'un rayonnement X dont l'énergie correspond à la différence entre les énergies de liaison des deux couches électroniques. L'autre place libérée est elle-même remplie et le processus continue jusqu'à ce qu'un électron extérieur à l'atome soit capté. Les rayons X sont émis dans des directions quelconques. Ce processus est très proche de la production de rayons X caractéristiques dans un tube à rayons X.

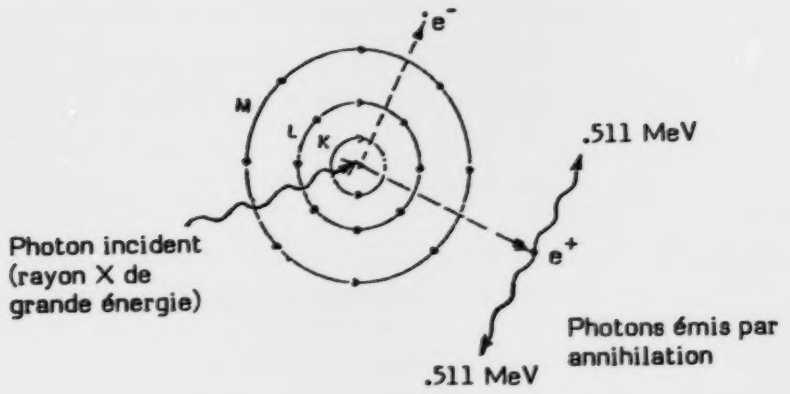
### 5.2.3 Production de paires

L'effet Compton et l'effet photoélectrique ne contribuent pas beaucoup à l'absorption des rayons gamma de grande énergie. Dans le domaine des grandes énergies, l'absorption d'un photon se fait d'abord avec production de paires, surtout lorsque les éléments ont un numéro atomique élevé. Pour ce processus, le seuil minimal d'énergie est de 1,02 MeV. (La masse d'un électron équivaut à 0,51 MeV.)

Dans la production de paires, il y a disparition complète du photon incident et création d'une paire d'électrons, un positif et un négatif. Toute l'énergie du photon est transmise à la paire d'électrons. Si elle est supérieure à 1,02 MeV, l'excédent est partagé par les électrons sous forme d'énergie cinétique.

L'électron et le positon perdent leur énergie cinétique par ionisation et par excitation. Le positon réagit avec un électron. Il y a annihilation de la paire et émission de deux photons de 0,51 MeV dans des directions opposées.

**Figure 14. Production de paires**



## 5.3 Atténuation

Le résultat global de ces trois formes d'interaction est une atténuation du faisceau de photons traversant une substance. L'atténuation est proportionnelle à l'épaisseur de l'absorbant et peut s'exprimer mathématiquement par:

$$I = I_0 e^{-\gamma X}$$

où $I_0$ = intensité initiale

$I$ = intensité après le parcours d'une distance $X$ dans le milieu absorbant

$\gamma$ = coefficient d'absorption linéaire

$e$ = constante exponentielle

Pour le calcul des écrans, il suffit généralement d'utiliser la couche de demi-atténuation (CDA) et la couche d'atténuation au dixième (CAD). Pour un matériau et un rayonnement donnés, ces valeurs correspondent respectivement à l'épaisseur de substance absorbante nécessaire pour atténuer un faisceau à la moitié et au dixième de sa valeur initiale. On peut exprimer cela mathématiquement de la façon suivante:

$$I = I_0/2^n$$
$$I = I_0/10^n$$

où "n" est la valeur de CDA ou de CAD.

Le Tableau 4 donne des valeurs approximatives de CAD et de CDA pour plusieurs matériaux et pour différents rayonnements.

**Tableau 4. Épaisseurs approximatives des couches d'atténuation à la moitié (CDA) et au dixième (CAD) pour les écrans protecteurs (en centimètres)**

| Source | Plomb | | Fer | | Béton | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CAD | CDA | CAD | CDA | CAD | CDA |
| Rayons X | | | | | | |
| 100 kVc | 0,08 | 0,02 | 0,83 | 0,25 | 5,84 | 1,77 |
| 150 kVc | 0,10 | 0,03 | 1,17 | 0,33 | 7,62 | 2,28 |
| 250 kVc | 0,25 | 0,08 | 3,04 | 0,99 | 9,14 | 2,79 |
| 400 kVc | 0,76 | 0,22 | 8,38 | 2,54 | 10,92 | 3,30 |
| 500 kVc | 1,27 | 0,38 | 13,97 | 4,06 | 11,68 | 3,55 |
| 1000 kVc | 2,54 | 0,81 | 20,32 | 6,35 | 15,24 | 4,57 |
| 2000 kVc | 3,81 | 1,27 | 26,67 | 8,89 | 20,32 | 6,22 |
| Co-60 | 4,11 | 1,24 | 7,36 | 2,20 | 22,86 | 6,85 |
| Ra-226 | 4,69 | 1,42 | 7,69 | 2,31 | 24,38 | 7,36 |
| Cs-137 | 2,13 | 0,63 | 5,71 | 1,72 | 18,03 | 5,33 |
| Ir-192 | 1,62 | 0,48 | - | - | 15,74 | 4,82 |

## 6. UNITÉS UTILISÉES DANS LES TRAVAUX SUR LES RAYONNEMENTS

Il est nécessaire de connaître les différentes unités de mesure des grandeurs radioactives et de comprendre comment elles sont liées. Des définitions de toutes les unités sont données dans le glossaire technique. Les paragraphes suivants présentent les plus importantes.

### 6.1 Unités de mesure de la radioactivité

L'unité de radioactivité, le curie, avait été établie pour représenter l'activité d'un gramme de radium. Une activité de 1 curie correspond à $3,7 \times 10^{10}$ désintégrations par seconde. Dans le système international (SI), adopté par le Canada, l'unité de radioactivité est le becquerel (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde. Donc:

1 curie (Ci) est équivalent à $3,7 \times 10^{10}$ Bq

et

1 Bq est équivalent à $27,03 \times 10^{-10}$ Ci

### 6.2 Unités d'énergie de rayonnement

A. Le becquerel renseigne sur le nombre de désintégrations, mais il n'indique pas l'énergie du rayonnement émis. Pour cela, l'unité utilisée était l'électron-volt. Dans le SI, c'est le joule.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Un électron-volt est la variation d'énergie d'un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt. La charge d'un électron étant très faible, l'électron-volt est une quantité infime d'énergie. L'énergie des rayonnements utilisés en radiographie est exprimée en millions d'électrons-volts (MeV). Un MeV est équivalent à $1,6 \times 10^{-13}$ J.

B. L'énergie d'un rayonnement X est souvent exprimée en kVc. Cette unité est l'abréviation de "kilovolts crête", unité de mesure de tension de crête appliquée à un tube à rayons X. Le kVc n'est pas une mesure directe de l'énergie de rayonnement, mais l'énergie et la tension dans le tube étant liées, il donne une indication de cette énergie. La couche de demi-absorption (CDA) renseigne aussi sur la qualité d'un faisceau de rayons X. La CDA est l'épaisseur d'un certain matériau (généralement Al ou Cu) qui atténue un faisceau à la moitié de son intensité initiale. La CDA d'un faisceau est fonction de son énergie efficace. L'énergie efficace, en KeV, est égale à

environ 1/3 de la tension appliquée. Elle dépend en quelque sorte de la nature de la source de tension, et elle augmente lorsqu'on ajoute un filtre.

## 6.3 Unités de dose de rayonnement

La caractéristique la plus importante des rayonnements alpha, bêta, gamma et X est leur capacité à ioniser les atomes et les molécules de la substance qu'ils traversent. L'unité de mesure de l'intensité d'un rayonnement X ou gamma est basée sur sa capacité d'ionisation. Cette unité, anciennement le roentgen, est maintenant le coulomb/kg.

### A. Coulomb/kg (roentgen)

Cette unité de dose d'exposition (anciennement le roentgen) mesure l'ionisation de l'air. C'est la quantité de rayonnement qui produit une unité électrostatique de quantité d'électricité dans un centimètre cube d'air, à TPN exprimée en coulombs par kilogramme.

$$1 \text{ coulomb/kg} = 3876 \text{ roentgen}$$

### B. Le gray (rad)

Le roentgen ne s'applique pas facilement à tous les systèmes. Lorsqu'on considère les dommages causés par les rayonnements dans les tissus vivants, on utilise une unité de dose absorbée. Cette unité, le gray (Gy), est égale à 1 joule/kg. L'ancienne unité était le rad, qui valait un centième de gray.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$
$$= 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

### C. Facteur de qualité (EBR)

EBR est l'abréviation d'efficacité biologique relative. Pour une même dose (Gy), différents rayonnements ionisants peuvent endommager plus ou moins les tissus biologiques. Par exemple, les particules alpha et les neutrons rapides peuvent causer plus de dommages que les rayons X et gamma couramment utilisés. L'EBR, pour les rayons X et gamma utilisés en radiographie, est égale à 1. On a remplacé cette unité par "Q", le facteur de qualité.

D. Le sievert (rem)

Le rem était une abréviation de l'expression roentgen-equivalent-man. Il était lié au rad par l'équation:

$$REM = RAD \times EBR$$

Pour les rayonnements X et gamma, l'EBR est égale à 1, et la dose en rem est donc la même que la dose en rad. Pour d'autres types de rayonnements, on introduit le facteur de qualité dans l'équation, qui devient alors:

$$H = D \times Q \times N$$

où H= équivalent de dose, en sieverts

D= dose absorbée en gray

Q= facteur de qualité

N= valeur estimée de tous les autres facteurs modificatifs.

Le nom de l'unité d'équivalent de dose est le sievert (Sv), qui remplace le rem. Le sievert est équivalent au $J.kg^{-1}$, comme le Gy.

$$1\ Sv = 100\ rem$$

# 7. EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS

## 7.1 Introduction

Fondamentalement, l'interaction des rayonnements avec la matière est la même pour les êtres vivants et les matières inertes. Toutes les lésions résultent de transformations chimiques engendrées par le rayonnement dans des molécules complexes présentes dans les cellules vivantes. Ces transformations peuvent être réversibles ou bien elles peuvent entraîner, à plus ou moins brève échéance, la modification ou la mort de la cellule.

La cellule contient environ 70 pour cent d'eau. Elle est entourée de molécules inorganiques, comme du NaCl, et de grosses molécules d'acides organiques et de protéines. Le noyau de la cellule contient un nombre donné de chromosomes, eux-mêmes constitués d'un grand nombre de gènes qui fixent la structure et la fonction de la cellule.

## 7.2 Phénomènes intracellulaires

Les effets des rayonnements ionisants sur les cellules se répercutent sur tout l'organisme.

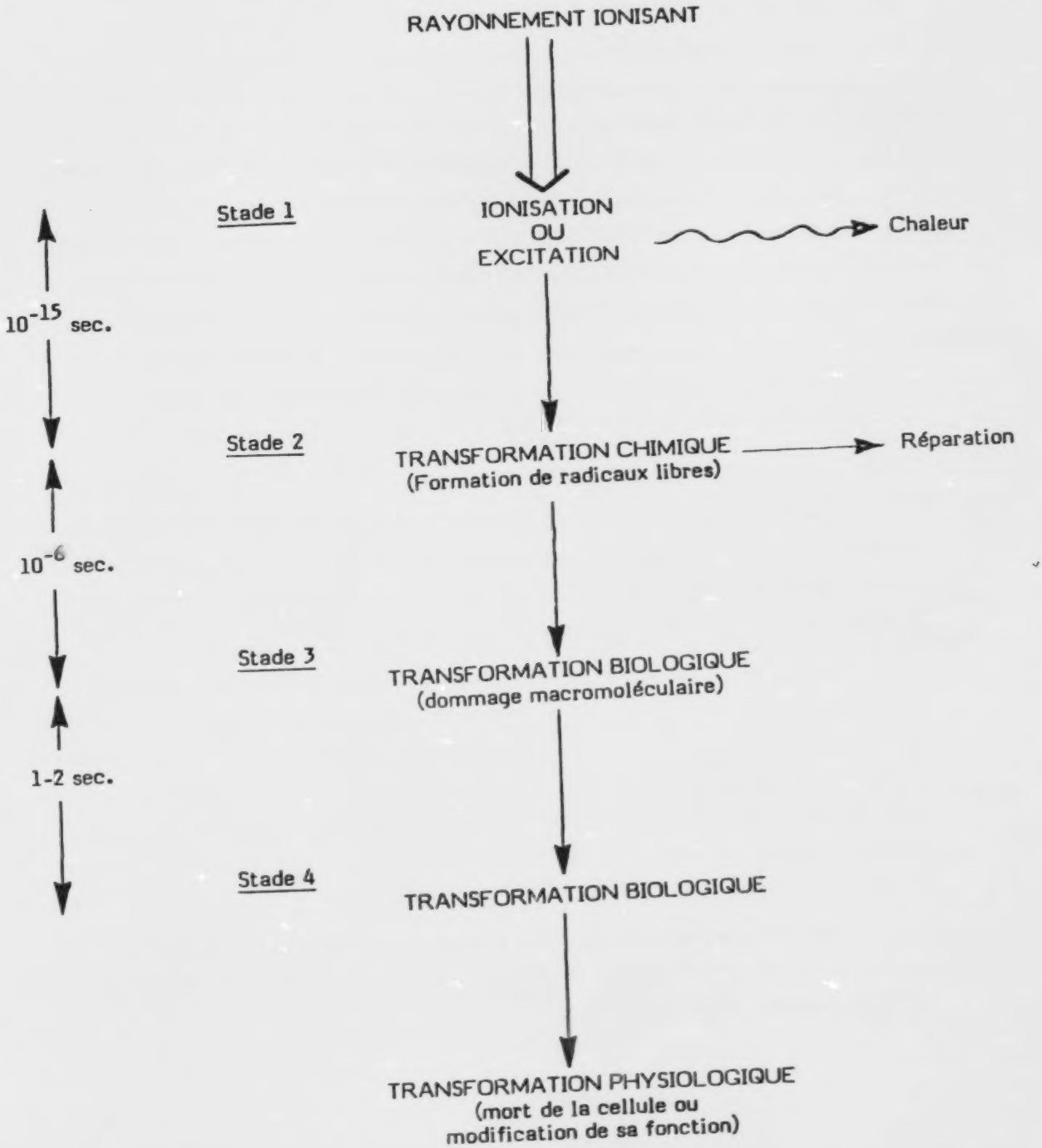
La Figure 15 illustre la séquence des phénomènes qui se produisent à l'intérieur d'une cellule exposée à un rayonnement.

La première phase de la lésion est la plus courte; elle dure environ $10^{-15}$ secondes. Pendant cette phase, de l'énergie envahit la cellule, ionisant et excitant les atomes et les molécules. La quantité de chaleur produite par ionisation est négligeable et n'a pas d'effet biologique.

L'ionisation directe de la molécule cible est appelée "effet direct".

Cela se produit lorsqu'un photon ou une particule ionise directement un constituant d'ADN, sans formation d'eau réactive ou d'ions $0^+$ intermédiaires. S'il y a production d'ions intermédiaires, on a alors un "effet indirect". Les principaux produits de l'absorption du rayonnement sont de l'hydrogène, des ions hydroxyles et des radicaux libres. L'hydrogène et les ions hydroxyles sont normalement présents dans la cellule vivante et ils ne causent pas de dommages. Les radicaux libres, par contre, qui contiennent des électrons non associés en paires, sont hautement réactifs. Le temps nécessaire pour la production de radicaux libres (stade 2) est d'environ $10^{-6}$ secondes.

**Figure 15. Séquence des phénomènes intracellulaires**



Comme le montre la Figure 15, les transformations biochimiques, à ce stade, peuvent être rectifiées, souvent par recombinaison, ce qui permet à la cellule de retrouver son état initial, sans dommage apparent. Cependant, s'il n'y a pas réparation, la séquence des phénomènes intracellulaires se poursuit.

Pendant la troisième phase (quelques secondes), les radicaux libres réagissent avec des molécules organiques. Les réactions avec les protéines et l'acide désoxyribonucléique (ADN) du noyau de la cellule sont particulièrement importantes. Elles induisent des transformations dans les structures secondaire ou tertiaire des protéines. Ces transformations peuvent engendrer des modifications dans les propriétés biologiques des molécules. La scission des molécules ou des liaisons croisées entre molécules d'ADN peuvent causer le cancer ou des dommages génétiques chez les descendants.

La dernière phase de la lésion par rayonnement est la phase biologique. Les transformations chimiques font place à des transformations cellulaires: mort prématurée de la cellule, inhibition ou retard de la division cellulaire, production de changements permanents et héréditaires.

## 7.3 Effets somatiques des rayonnements

Les effets somatiques des rayonnements interviennent principalement dans la division cellulaire. Des lésions graves seront donc probablement observées dans les cellules qui se divisent rapidement, comme les cellules du système lymphoïde, les granulocytes et les cellules tapissant les voies gastro-intestinales.

Après une exposition de 25 rad ou plus, le nombre de lymphocytes dans les vaisseaux périphériques tombe rapidement. Les plaquettes et les globules rouges dans le système périphérique diminuent aussi quelques jours après l'exposition et reviennent ensuite à leur nombre initial si la dose de rayonnement n'a pas été trop forte. L'hémogramme est très utilisé pour la surveillance des patients soumis à une radiothérapie. On procède aussi à des hémogrammes et à des examens cytogénétiques sur les personnes soumises à une surexposition professionnelle.

Les effets biologiques des rayonnements apparaissant longtemps après l'exposition comprennent différents types de cancers, la formation de cataractes et un raccourcissement de la vie.

## 7.4 Effets génétiques des rayonnements

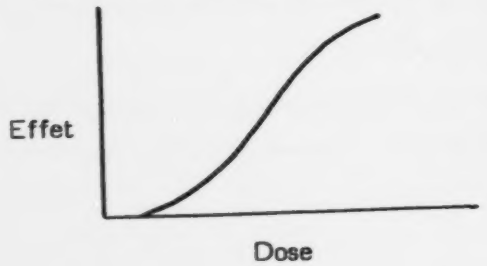
Les effets génétiques des rayonnements sont des mutations dans les oeufs de la femelle ou dans les spermatozoïdes du mâle. La lésion la plus grave est probablement la mort de l'embryon ou du foetus.

## 7.5 Courbes dose-effet

Afin de définir des niveaux d'exposition acceptables, il est utile de trouver une relation entre la dose reçue et la réponse ou la lésion produite.

La Figure 16 ci-après est une courbe avec seuil. Le point d'intersection de la courbe avec l'axe des X correspond à la dose seuil, c'est-à-dire la dose au-dessous de laquelle il n'y a pas d'effet. Lorsque l'effet du rayonnement est facilement observable (par exemple, un rougissement de la peau), on peut se servir de ce type de courbe.

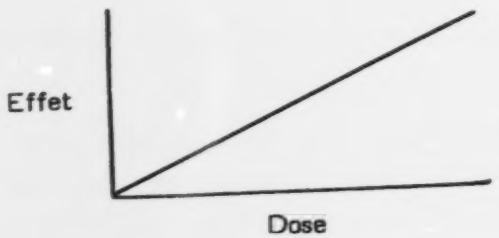
**Figure 16. Courbe avec seuil**




L'effet ne se manifeste qu'après une certaine dose minimale. Ces effets sont appelés non stochastiques.

La Figure 17 est une relation linéaire, sans seuil. La courbe passe par l'origine. On suppose ici que toute dose, si petite soit-elle, aura un certain effet, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de seuil. Ces effets sont appelés stochastiques. Les effets génétiques et les cancers en sont des exemples.

**Figure 17. Courbe sans seuil**



## 7.6 Exposition humaine aux rayonnements

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de seuil, toute exposition aux rayonnements est potentiellement dangereuse. En ce qui concerne les personnes qui travaillent avec des sources de rayonnement, les patients soumis à des examens radiographiques ou à des traitements aux radionucléides, et le public en général, il est nécessaire d'établir des niveaux de dose de rayonnement pour lesquels les dangers de lésion sérieuse chez l'individu sont si faibles qu'ils peuvent paraître acceptables à l'individu et à la société en général.

En 1928, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a été créée dans le but de prodiguer des conseils en matière de protection contre les radiations et de faire des recommandations sur les principes fondamentaux et les limites de dose de rayonnement. Elle s'assure que l'emploi de toute source d'exposition est justifié par ses avantages, que les expositions nécessaires sont aussi faibles que possible (principe ALARA) et que les expositions individuelles ne dépassent pas certaines limites spécifiées.

En ce qui concerne la population en général, les doses aux gonades, pour différentes sources de rayonnement, sont évaluées à:

| | |
|---|---|
| Exposition ambiante | 1 mSv/an (100 mrem/an) |
| Expositions médicales et autres | 1 mSv/an (100 mrem/an) |
| Retombées | 0,2 mSv/an (20 mrem/an) |

Au Canada, pour la population, la dose maximale admissible aux gonades ou au corps entier est de 5 mSv/an (0,5 rem/an).

En ce qui concerne les travailleurs exposés aux rayonnements atomiques, au Canada, cette dose est de 50 mSv/an (5 rem/an) et elle ne doit pas dépasser 30 mSv (3 rem) par trimestre.

## 8. UTILISATIONS MÉDICALES DES RADIO-ISOTOPES

Les utilisations médicales des radio-isotopes se répartissent en deux grandes catégories: les sources non scellées et les sources scellées.

### 8.1 Les sources non scellées

Le sort final des radionucléides qui pénètrent dans le corps dépend de leurs propriétés chimiques et de leurs interactions avec les constituants naturels des cellules et des tissus. Certaines substances se dispersent dans tout le corps alors que d'autres se concentrent dans des organes ou des tissus spécifiques. Les radionucléides de l'iode se concentrent dans la glande thyroïde, alors que ceux du calcium et du radium se déposent surtout dans le squelette. La rétention des radionucléides dans le corps peut grandement varier, depuis l'élimination complète en quelques heures jusqu'à des temps de rétention de plusieurs années, suivant les propriétés chimiques et physiques des substances déposées.

En médecine nucléaire, lorsque l'on utilise des sources non scellées de radionucléide, les substances radioactives peuvent pénétrer accidentellement dans le corps de plusieurs façons: elles peuvent être ingérées, inhalées sous forme de gaz, d'aérosols ou de poussières, ou bien absorbées à travers la peau ou par une blessure. On ne retirera donc tous les avantages de ces instruments de diagnostic et de traitement que si l'on en comprend bien les dangers.

En médecine, les sources non scellées, ou ouvertes, sont surtout utilisées comme traceurs. Plusieurs propriétés des isotopes permettent une telle utilisation:

(i) les isotopes de n'importe quel élément, radioactifs ou non, se comportent de la même façon dans les réactions physiques et chimiques;

(ii) il est assez facile de détecter et d'évaluer avec précision de très petites quantités d'un radio-isotope;

(iii) on peut évaluer quantitativement des radio-isotopes sans détruire la substance analysée.

Ces propriétés ont conduit à l'utilisation en médecine d'un certain nombre de radio-isotopes. L'utilisation de l'iode radioactif pour le diagnostic et le traitement des troubles de la glande thyroïde en est un bon exemple. L'hormone produite par la

thyroïde est riche en iode, et chez une personne normale, entre 15 et 40 pour cent de l'iode absorbé atteint la glande dans les 24 heures. On peut donc avoir une bonne indication du fonctionnement de la glande thyroïde en faisant ingérer de l'iode radioactif: on suit alors le cheminement de l'iode et on mesure la quantité absorbée par la glande. De plus, on peut utiliser des doses importantes d'iode radioactif pour le traitement des tumeurs de la glande thyroïde.

On a étudié presque toutes les fonctions de l'organisme avec des traceurs radioactifs. Les organes qui peuvent être explorés par des isotopes sont les poumons, le squelette, le foie, la rate, le cerveau et les reins. De plus, des isotopes ont été utilisés pour étudier le fonctionnement des reins, du foie, du coeur, des intestins et des poumons. Des radio-isotopes comme ceux du fer, du chrome, du cobalt et de l'iode sont utilisés pour mesurer le volume de sang et pour étudier l'anémie et d'autres troubles sanguins.

## 8.2 Les sources scellées

Des sources scellées sont des substances radioactives enfermées dans des capsules solides conçues pour résister à une manipulation normale. L'effet destructif du rayonnement peut être utilisé pour tuer des cellules cancéreuses malignes. Par chance, beaucoup de cellules cancéreuses sont plus sensibles que les cellules normales, ce qui permet le traitement de nombreux cancers par radiothérapie.

On a d'abord employé le radium. Puis, il a été remplacé par le césium, en Amérique du Nord. Le traitement consiste à placer une source de césium, sous forme d'une aiguille ou d'un tube, au voisinage de la tumeur cancéreuse. Cependant, pour de nombreuses formes de cancers, on préfère irradier à distance (téléthérapie). Pour cette forme de traitement, on a mis au point des méthodes pour irradier la tumeur avec des doses massives, tout en exposant les tissus sains à des doses relativement faibles. Les dispositifs de téléthérapie sont chargés de $^{60}Co$, un isotope qui émet un rayonnement gamma très pénétrant, a une période radioactive de 5,2 années, et est relativement peu coûteux. Les rayons X et différents types d'accélérateurs de particules de haute énergie sont aussi utilisés en radiothérapie.

Certaines formes de cancers de la peau sont traitées avec des isotopes émettant des rayonnements bêta, utilisés sous forme de sources scellées. On trouve dans le commerce des plaques de strontium-90, destinées à cet usage.

# 9. INSTALLATIONS DE LABORATOIRE POUR LA MANIPULATION DES RADIO-ISOTOPES

## 9.1 Introduction

La conception d'un laboratoire où l'on manipule des substances radioactives peut varier considérablement; cela peut aller d'une simple table qu'on réserve à cette fin dans un laboratoire ordinaire de chimie ou de pathologie jusqu'à un laboratoire de conception et de construction spéciales. Dans un hôpital où l'on dispose d'installations de médecine nucléaire, des règles de sécurité additionnelles s'appliquent à la préparation et à l'administration de médicaments radioactifs.

Les dangers associés aux radionucléides dépendent de l'utilisation qui en est faite, de la toxicité du composé radioactif et du niveau de radioactivité. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a réparti les radionucléides courants en différentes classes de toxicité et a fixé pour chaque classe les niveaux d'activité admissibles dans trois catégories de laboratoires (A, B et C).

Les quatre classes de radiotoxicité sont présentées dans les Tableaux 6 à 9.

Le Tableau 5 ci-dessous indique la catégorie de laboratoire requise pour différents niveaux d'activité et de toxicité de radionucléides.

**Tableau 5. Types de laboratoires**

| Radiotoxicité de l'isotope | Type de laboratoire requis pour les niveaux d'activité spécifiés ci-dessous | | |
|---|---|---|---|
| | Laboratoire à bas niveau d'activité (C) | Laboratoire à niveau d'activité moyen (B) | Laboratoire à haut niveau d'activité (A) |
| Très élevée | 10 Ci | 10 Ci à 1 mCi | 1 mCi |
| Élevée | 1 mCi | 1 mCi à 100 mCi | 100 mCi |
| Moyenne | 100 mCi | 100 mCi à 10 Ci | 10 Ci |
| Faible | 10 Ci | 10 Ci à 1000 Ci | 1000 Ci |

## 9.2 Détails sur les types de laboratoires

### 9.2.1 Laboratoire à haut niveau d'activité

Les laboratoires de la catégorie A permettent des niveaux d'activité que l'on ne rencontre habituellement pas dans un hôpital. L'opération la plus dangereuse

normalement entreprise dans un hôpital consiste à administrer des doses de 80 à 200 mCi ($^{131}I$) pour le traitement du carcinome de la glande thyroïde. On s'expose aussi à des quantités de l'ordre de plusieurs millicuries dans le marquage au $^{125}I$ et au $^{131}I$. Ces opérations peuvent être entreprises sans danger dans un laboratoire de catégorie B.

9.2.2 Laboratoire à niveau d'activité moyen

Les principales caractéristiques d'un laboratoire de catégorie B sont:

1. le laboratoire est réservé à la manipulation des radionucléides;
2. on doit porter des vêtements de protection (tablier ou combinaison de travail, gants et couvre-chaussures);
3. la pression doit être négative, avec évacuation vers l'extérieur du bâtiment, afin de prévenir toute contamination à l'intérieur;
4. le laboratoire doit être équipé de hottes et de boîtes à gants;
5. les planchers, les murs et les tables de travail doivent être lisses, sans fissures, et les surfaces doivent être lavables, non absorbantes;
6. les tables de travail doivent être assez solides pour supporter des écrans de plomb;
7. les robinets des lavabos doivent pouvoir être actionnés par le coude ou le pied;
8. l'évier doit être lié directement à la conduite principale, pour l'évacuation des déchets radioactifs liquides.

9.2.3 Laboratoire à bas niveau d'activité

Les laboratoires de la catégorie C conviennent à tous les travaux de traçage et aux opérations simples mettant en jeu des isotopes peu dangereux, d'activité de l'ordre du millicurie. On peut utiliser n'importe quel laboratoire de chimie classique, avec un plancher recouvert de linoléum. Les tables de travail doivent avoir des surfaces non absorbantes et être recouvertes d'un tapis protecteur jetable. Il doit y avoir une hotte et un ventilateur. L'air doit être évacué vers l'extérieur, mais n'a pas besoin d'être filtré. Les surfaces de travail doivent être assez solides pour supporter des écrans de plomb.

**Tableau 6. Radionucléides de toxicité très élevée**

| | |
|---|---|
| ACTINIUM-227 | PLUTONIUM-240 |
| AMÉRICIUM-241 | PLUTONIUM-241 |
| AMÉRICIUM-243 | PLUTONIUM-242 |
| CALIFORNIUM-249 | POLONIUM-210 |
| CALIFORNIUM-250 | PROTACTINIUM-213 |
| CALIFORNIUM-252 | RADIUM-223 |
| CURIUM-242 | RADIUM-226 |
| CURIUM-243 | RADIUM-228 |
| CURIUM-244 | THORIUM-227 |
| CURIUM-245 | THORIUM-228 |
| CURIUM-246 | THORIUM-230 |
| NEPTUNIUM-237 | URANIUM-230 |
| PLOMB-210 | URANIUM-232 |
| PLUTONIUM-238 | URANIUM-233 |
| PLUTONIUM-239 | URANIUM-234 |

**Tableau 7. Radionucléides de toxicité élevée**

| | | |
|---|---|---|
| ACTINIUM-228 | EUROPIUM-152 | STRONTIUM-90 |
| ANTIMOINE-124 | EUROPIUM-154 | TANTALE-182 |
| ANTIMOINE-125 | HAFNIUM-181 | TELLURE-127M |
| ARGENT-110M | INDIUM-144M | TELLURE-129M |
| ASTATE-211 | IODE-124 | TERBIUM-160 |
| BARYUM-140 | IODE-126 | THALLIUM-204 |
| BERKELIUM-249 | IODE-131 | THORIUM-234 |
| BISMUTH-207 | IODE-133 | THULIUM-170 |
| BISMUTH-210 | IRIDIUM-192 | URANIUM-236 |
| CADMIUM-115M | MANGANÈSE-54 | ZIRCONIUM-95 |
| CALCIUM-45 | PLOMB-212 | |
| CÉRIUM-144 | PROTACTINIUM-230 | |
| CÉSIUM-134 | RADIUM-224 | |
| CÉSIUM-137 | RUTHÉNIUM-106 | |
| CHLORE-36 | SCANDIUM-46 | |
| COBALT-56 | SODIUM-22 | |
| COBALT-60 | STRONTIUM-89 | |

**TABLEAU 8. Radionucléides de toxicité moyenne**

| | | |
|---|---|---|
| ANTIMOINE-122 | IODE-132 | RHÉNIUM-183 |
| ARGENT-105 | IODE-134 | RHÉNIUM-186 |
| ARGENT-111 | IODE-135 | RHÉNIUM-188 |
| ARGON-41 | IRIDIUM-190 | RHODIUM-105 |
| ARSENIC-73 | IRIDIUM-194 | RUBIDIUM-86 |
| ARSENIC-74 | KRYPTON-85M | RUTHÉNIUM-97 |
| ARSENIC-76 | KRYPTON-87 | RUTHÉNIUM-103 |
| ARSENIC-77 | LANTHANE-140 | RUTHÉNIUM-105 |
| BARYUM-131 | LUTETIUM-177 | SAMARIUM-151 |
| BERYLLIUM-7 | MANGANÈSE-52 | SAMARIUM-153 |
| BISMUTH-206 | MANGANÈSE-56 | SCANDIUM-47 |
| BISMUTH-212 | MERCURE-197M | SCANDIUM-48 |
| CADMIUM-109 | MERCURE-197 | SÉLÉNIUM-75 |
| CADMIUM-115 | MERCURE-203 | SILICIUM-31 |
| CALCIUM-47 | MOLYBDÈNE-99 | SODIUM-24 |
| CARBONE-14 | NÉODYME-147 | SOUFRE-35 |
| CÉRIUM-141 | NÉODYME-149 | STRONTIUM-85 |
| CÉRIUM-143 | NEPTUNIUM-239 | STRONTIUM-91 |
| CÉSIUM-131 | NICKEL-63 | TECTHÉTIUM-96 |
| CÉSIUM-136 | NICKEL-65 | TECHNÉTIUM-97M |
| CHLORE-38 | NIOBIUM-93M | TECHNÉTIUM-97 |
| CHLORE-51 | NIOBIUM-95 | TECHNÉTIUM-99 |
| COBALT-57 | OR-196 | TELLÉRIUM-125M |
| COBALT-58 | OR-198 | TELLÉRIUM-127 |
| CUIVRE-64 | OR-199 | TELLÉRIUM-129 |
| DYSPROSIUM-165 | OSMIUM-185 | TELLÉRIUM-131M |
| DYSPROSIUM-166 | OSMIUM-191 | TELLÉRIUM-132 |
| ERBIUM-169 | OSMIUM-193 | THALLIUM-200 |
| ERBIUM-171 | PALLADIUM-103 | THALLIUM-201 |
| ÉTAIN-113 | PALLADIUM-109 | THALLIUM-202 |
| ÉTAIN-125 | PHOSPHORE-32 | THURIUM-231 |
| EUROPIUM-152M | PLATINE-191 | THULIUM-171 |
| EUROPIUM-155 | PLATINE-193 | TUNGSTÈNE-181 |
| FER-52 | PLATINE-197 | TUNGSTÈNE-185 |
| FER-55 | PLOMB-203 | TUNGSTÈNE-187 |
| FER-59 | POTASSIUM-42 | VANADIUM-48 |
| FLUOR-18 | POTASSIUM-43 | XÉNON-135 |
| GADOLINIUM-153 | PRASÉODYME-142 | YTTERBIUM-175 |
| GADOLINIUM-159 | PRASÉODYME-143 | YTTRIUM-90 |
| GALLIUM-72 | PROMÉTHIUM-147 | YTTRIUM-92 |
| HOLMIUM-166 | PROMÉTIUM-149 | YTTRIUM-93 |
| INDIUM-115M | PROTACTINIUM-233 | ZINC-65 |
| IODE-125 | RADON-220 | ZINC-69M |
| IODE-130 | RADON-222 | ZIRCONIUM-97 |

**Tableau 9. Radionucléides de faible toxicité**

| | |
|---|---|
| Arcon-37 | Rhodium-103M |
| Césium-134M | Rubidium-87 |
| Césium-135 | Samarium-147 |
| Cobalt-58M | Strontium-85M |
| Germanium-71 | Technétium-96M |
| Hydrogène-3 | Technétium-99M |
| Indium-113M | Thorium-232 |
| Iode-129 | Thorium naturel |
| Krypton-85 | Uranium-235 |
| Nickel-59 | Uranium-238 |
| Niobium-97 | Uranium naturel |
| Osmium-191M | Xénon-131M |
| Oxygène-15 | Xénon-133 |
| Platine-193M | Yttrium-91M |
| Platine-197M | Zinc-69 |
| Rhénium-187 | Zirconium |

# 10. RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR LA MANIPULATION DES RADIO-ISOTOPES

## 10.1 Introduction

L'exposition aux rayonnements peut être consécutive à une irradiation externe directe, par une source, ou à une contamination du lieu de travail avec des matières radioactives. L'irradiation interne peut être due à l'inhalation ou à l'ingestion de radionucléides.

La radioprotection est basée sur deux principes fondamentaux: réduire au minimum l'exposition aux rayonnements des personnes manipulant les matières radioactives et éviter la contamination en dehors du laboratoire.

Les règles à suivre pour la manipulation des matières radioactives au laboratoire sont les suivantes.

## 10.2 Précautions générales

1. Désigner une personne qui aura la responsabilité de faire observer les règles de sécurité dans le travail avec les matières radioactives; son nom et son numéro de téléphone doivent apparaître clairement sur la porte du laboratoire.
2. Fermer le laboratoire à clé lorsqu'il n'est pas occupé.
3. N'admettre aucune personne non autorisée dans le laboratoire.
4. Ne pas manger, ni boire, ni fumer dans le laboratoire.
5. Ne pas pipeter les solutions radioactives avec la bouche.
6. Ne pas travailler avec des matières radioactives si l'on a des plaies.
7. Utiliser des gants de caoutchouc dès qu'il y a risque de contamination.
8. Porter un tablier de laboratoire; ce tablier devra être inspecté avant d'être sorti du local.
9. Porter un dosimètre, lorsque la loi l'impose.
10. Utiliser une hotte ou une boîte à gants pour tout travail avec des substances sèches ou volatiles.
11. Poser des revêtements absorbants jetables sur les plateaux et autres surfaces de travail.

12. Ne pas utiliser à d'autres fins la verrerie qui a servi pour des substances radioactives.

13. Inspecter le matériel avant de le sortir du local.

14. Inspecter régulièrement et, si nécessaire, décontaminer le matériel, les plateaux, le plancher et les surfaces de travail. Le faire aussi lorsque le travail est terminé.

15. Se laver les mains et, si nécessaire, procéder à une inspection complète avant de quitter l'édifice.

10.3 Entreposage et élimination des décnets

1. Marquer les contenants à déchets et les entrepôts de matières radioactives avec un symbole avertissant du danger de rayonnements. Indiquer la date, la nature et la quantité des substances radioactives sur les contenants à déchets.

2. Entreposer les matières radioactives dans un lieu sûr, protégé par blindage.

3. Ne pas se débarrasser de déchets, quels qu'ils soient, sans l'approbation de la personne responsable.

10.4 Accidents

1. Obéir aux consignes d'urgence en vigueur dans l'établissement.

2. Prendre des mesures immédiates pour éviter la contamination et interdire l'entrée.

3. Prévenir la personne responsable.

Certaines règles fondamentales s'appliquent à tout travail avec des sources de rayonnement. Trois points doivent rester présents à l'esprit: le temps, la distance et l'écran protecteur.

10.5 Le temps d'exposition

Plus le temps d'exposition est court, moins la dose reçue est importante. Les procédures de laboratoire doivent être éprouvées d'abord avec des matières inactives et toutes les opérations avec des sources radioactives doivent s'effectuer aussi rapidement que possible, de manière satisfaisante et sans danger.

10.6 La distance

L'intensité du rayonnement en n'importe quel point est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source. Le débit de dose à deux mètres d'une source est seulement le quart de ce qu'il vaut à un mètre. La distance est un facteur de sécurité, et il faut en tirer avantage dans toutes les opérations avec des radio-isotopes. Cela devient particulièrement important pour toute manipulation d'une source non scellée. Il est alors absolument nécessaire d'utiliser des outils à longs manches.

10.7 L'écran protecteur

Lorsqu'il est impossible d'effectuer le travail assez rapidement ou à une distance telle que le rayonnement est réduit à un niveau acceptable, il est nécessaire d'intercaler un écran quelconque qui absorbera une grande partie du rayonnement. L'épaisseur et le type d'écran dépendront du type et de l'intensité de la source. Des détails sont donnés dans d'autres chapitres.

10.8 Sources scellées

Les précautions à prendre lors de la manipulation de sources scellées se résument ainsi:

1. Les sources scellées doivent être inspectées régulièrement. On vérifiera s'il n'y a pas de fuite, si elles ne sont pas abîmées et s'il n'y a pas de danger de contamination. La fréquence des inspections dépend de la nature de la source et du type d'utilisation. Si l'on pense que la source est endommagée, on doit la retourner immédiatement au fournisseur en prenant les précautions appropriées.
2. Les sources doivent être utilisées sous la surveillance d'une personne qualifiée.
3. Les sources doivent être manipulées de telle sorte que la dose de rayonnement soit réduite au minimum (temps de travail limité, distance suffisante, écran au besoin).
4. On doit procéder à des contrôles détaillés et on doit afficher des avertissements. Les fuites provenant de sources partiellement scellées doivent être indiquées. Le dispositif doit porter des avertissements appropriés.
5. Si la source elle-même doit être manipulée, on doit se servir d'instruments à longs manches et d'un écran temporaire. Dans de telles situations, l'écran doit être placé aussi près que possible de la source.

6. Le dispositif radioactif doit être protégé contre les dommages. Si l'on pense qu'il est endommagé, on ne doit pas l'utiliser, à moins qu'une personne qualifiée l'ait examiné et l'ait déclaré sans danger.

7. Toute personne travaillant dans le voisinage d'un dispositif radioactif doit être avertie des risques et des procédures à suivre en cas d'accident.

8. Toute personne susceptible de recevoir des doses d'exposition non négligeables doit porter un dosimètre individuel.

9. Lorsqu'ils ne sont pas utilisés, les dispositifs contenant des sources radioactives doivent être entreposés dans des enceintes fermées à clé et blindées, autour desquelles les niveaux de rayonnement doivent rester inférieurs à 0,25 mrem/h.

## 10.9 Précautions générales pour la santé

### 1. Vêtements protecteurs

Le degré de protection offert par un vêtement dépend de l'activité de la source utilisée. Même la manipulation d'indicateurs nécessite le port, sur les vêtements ordinaires, d'un tablier de laboratoire ou d'une blouse protectrice. Lors de travaux radiochimiques ou biologiques courants, on doit porter une combinaison de travail ou d'autres vêtements. Les vêtements protecteurs utilisés dans les zones de radioactivité ne doivent pas être portés ailleurs. Cela s'applique même si les niveaux sont très bas, afin d'éviter toute contamination.

On doit porter des gants de plastique ou de caoutchouc pour manipuler des matières radioactives. Ces gants ne doivent pas servir à d'autres fins, même dans le laboratoire. À remarquer que ces gants empêchent le rayonnement bêta mou (émis par le C-14 et le S-35 par exemple) d'atteindre la peau, mais qu'ils n'arrêtent pas les rayonnements durs des composés au tritium. Par conséquent, le port de gants ne protège pas nécessairement la peau contre une exposition intense.

Des couvre-chaussures spéciaux (ou de caoutchouc) doivent être portés s'il y a des risques que la matière radioactive soit renversée sur le plancher. Dans certains cas, il est préférable de réserver une paire de chaussures pour le travail en laboratoire.

2. Surveillance individuelle

La détection d'un rayonnement nécessite un instrument spécial. Dans chaque laboratoire où des sources radioactives ouvertes sont utilisées, on doit disposer d'un appareil permettant une estimation qualitative de la contamination.

Lorsque des sources émettrices de rayons gamma de 100 mCi ou plus sont utilisées, le laboratoire doit comporter une chambre d'ionisation de type débitmètre, pour la mesure de l'intensité du champ de rayonnement.

Les personnes susceptibles de recevoir plus de trois dixièmes de la dose maximale admissible doivent porter des moniteurs individuels. L'appareil le plus utilisé est le dosimètre thermoluminescent, qui convient aux personnes travaillant avec des rayons X et des rayons gamma. Les dosimètres de poche sont portés pour de courtes périodes et sont utilisés pour déterminer immédiatement la dose reçue.

Il est quelquefois possible de mesurer en dehors du corps le rayonnement émis par des radionucléides présents dans le corps. On peut ainsi détecter des radionucléides dans un organe particulier ou dans le corps entier avec un anthropomoniteur. Par exemple, on peut évaluer la quantité d'iode-131 dans la glande thyroïde en mesurant le rayonnement gamma dans la région du cou.

L'anthropomoniteur est utile en cas de contamination et en recherche.

L'analyse d'urine est l'une des techniques les plus utiles, pour la surveillance biologique individuelle. Cependant, le taux d'excrétion d'un radionucléide dans l'urine indique seulement le taux d'élimination du nucléide par les reins. Cela ne reflète pas nécessairement la quantité retenue dans le corps. La relation entre la quantité de radioactivité dans le corps et la quantité éliminée dans l'urine varie selon le métabolisme du nucléide, la quantité absorbée et la solubilité de la substance.

3. Prévention de la contamination

Tout travail avec des radionucléides non scellés doit s'effectuer au-dessus d'un plateau recouvert d'un matériau absorbant. S'il y a pulvérisation, ou émission de fumées ou de gaz, le travail doit se faire sous une hotte. Après le travail, chaque personne doit nettoyer chaque pièce contaminée et, si nécessaire, doit se charger de l'élimination. Les plateaux et les surfaces de travail doivent aussi

être nettoyés après usage. Le personnel doit se laver parfaitement les mains et en vérifier l'inactivité avant de quitter le laboratoire.

Un système de contrôle de la contamination doit être établi sur une base régulière, avec des instruments et des techniques convenant aux substances employées. Le contrôle doit porter non seulement sur le laboratoire, mais aussi sur les personnes et les articles qui sortent du laboratoire.

Un point important en matière de prévention de la contamination est le nettoyage régulier et adéquat de la zone radioactive. La personne en charge du nettoyage doit être consciente de la nécessité de prendre des précautions. Le travail ne doit pas être confié au service d'entretien général.

4. Situations d'urgence

Si une substance radioactive a été renversée, les mesures à prendre dépendront de la radioactivité et de la radiotoxicité du nucléide. L'équipement doit être facilement accessible, en cas d'urgence, dans n'importe quel service où l'on manipule des quantités de substances radioactives non négligeables. Le matériel essentiel dépend du type de travail effectué, mais il doit inclure: des vêtements protecteurs, des matières de décontamination, des panneaux d'avertissement, de l'équipement pour la manipulation, des installations pour l'entreposage temporaire et l'élimination des articles contaminés, et des moniteurs portatifs.

Si, lors d'un accident, le personnel ou les patients ont été blessés on doit administrer les premiers soins et faire appel à une personne compétente en matière de protection de la santé, comme un hygiéniste, et on doit prévenir le responsable de la radioprotection (ou son équivalent).

Ensuite, il faut éviter que la contamination se répande et il faut évacuer l'endroit où la substance a été renversée. On doit s'assurer que les personnes qui quittent les lieux ne sont pas contaminées.

On doit décontaminer les personnes avant d'entreprendre le nettoyage.

On considère que le renversement est mineur si la quantité de radio-isotopes se situe dans la gamme des quantités applicables à un laboratoire à bas niveau d'activité. Les risques pour le personnel sont alors négligeables.

Si la substance renversée est liquide, on doit la recouvrir immédiatement d'un papier absorbant. Dans le cas d'une substance solide, on utilisera un papier

absorbant humide. Les papiers seront jetés dans un contenant approprié, et l'on procédera au contrôle de la zone concernée. La décontamination se poursuivra ensuite jusqu'à ce que l'activité soit autant que possible éliminée. On doit toujours essuyer vers le point de renversement, et l'on doit commencer la décontamination en ce point, avant de s'occuper des zones avoisinantes où la contamination est faible.

Les renversements sont majeurs lorsque la quantité d'isotopes est supérieure à celle admise dans un laboratoire à bas niveau d'activité. Il y a alors situation d'urgence, mais les mesures à prendre dépendront des circonstances. Les règles concernant les renversements majeurs doivent donc être établies localement et affichées dans les laboratoires.

# 11. RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR LES SOURCES SCELLÉES DE RAYONNEMENTS BÊTA ET GAMMA

## 11.1 Règles générales

A. Toutes les sources de rayonnement bêta et gamma doivent être scellées.

B. On doit pouvoir identifier chaque source et, dans la mesure du possible, y inscrire des renseignements sur la nature et l'activité du nucléide, et la date de fabrication.

C. On doit tenir un dossier sur toutes les sources et sur leur circulation, afin de réduire au minimum les risques de perte et les dangers qui en résulteraient. En cas de perte, effective ou présumée, on doit prévenir immédiatement la personne responsable de la radioprotection.

D. Les personnes non autorisées ne doivent pas avoir accès aux sources.

E. On doit tenir compte des dangers de rayonnement consécutifs à un incendie.

F. On doit procéder périodiquement à des contrôles, pour vérifier s'il y a contamination ou fuite. Les sources défectueuses ne doivent pas être utilisées avant d'avoir été réparées de façon satisfaisante.

G. Lorsque les sources sont susceptibles de libérer des gaz radioactifs, on doit ventiler efficacement l'entrepôt avant de l'ouvrir.

## 11.2 Les sources de rayonnement bêta

A. Les sources de rayonnement bêta qui ne sont pas conservées dans un appareil doivent être protégées adéquatement pendant l'entreposage et le transport.

B. Lorsque cela s'impose, une protection convenable sera assurée par des écrans et des chicanes. La source doit toujours être manipulée à distance.

C. Il faut savoir que toute source de rayons bêta émet un rayonnement de freinage, qu'elle soit conçue pour cela ou non. Il peut aussi y avoir émission d'autres types de rayonnements pénétrants, comme des rayons gamma, des rayons X caractéristiques et des rayonnements d'annihilation. Il faut évaluer les dangers associés à ces rayonnements et prendre les précautions nécessaires.

D. Une fenêtre de faible épaisseur doit être aménagée dans les sources de rayons bêta. La fenêtre et son cadre doivent être construits de façon à empêcher toute

fuite de matière radioactive. Lorsque la source n'est pas utilisée, la fenêtre doit être recouverte d'un écran d'une épaisseur suffisante pour arrêter tout le rayonnement bêta. Il est préférable que l'écran soit constitué d'un métal de numéro atomique peu élevé, afin de réduire le rayonnement de freinage. On recommande les écrans de métal car ils risquent moins d'être endommagés par les rayonnements que les plastiques, par exemple. Au besoin, on installera un écran extérieur, de numéro atomique élevé, afin d'atténuer le rayonnement de freinage. La source doit être manipulée avec précaution et le moins possible, et elle doit être à l'abri des substances abrasives et corrosives. Lorsqu'on nettoie la fenêtre, on doit prendre des précautions pour ne pas l'endommager et pour éviter l'irradiation du personnel.

11.3 Sources de rayons gamma à usage médical

Lorsque seuls des rayons gamma doivent être utilisés, le contenant de la matière radioactive doit, autant que possible, être suffisamment épais pour qu'une grande partie du rayonnement bêta soit absorbée.

11.3.1 Thérapie avec des sources sans collimateur

1. Règles générales

a) En dehors des périodes d'utilisation et de transport, les sources et les localisateurs avec source incorporée doivent être placés dans une enceinte protectrice. La nature et l'épaisseur des parois de cette enceinte doivent être telles que personne n'est exposé à un débit de dose supérieur au maximum admissible.

b) L'enceinte protectrice doit être construite de façon à réduire au minimum l'exposition du personnel manipulant les sources. Les facteurs importants dont il faut tenir compte sont: la distribution des sources, les écrans autour des morceaux séparés et le temps mis par les employés pour sortir les sources de l'enceinte et pour les y remettre.

c) Le transport des sources à l'intérieur de l'établissement doit se faire de façon à assurer la protection de chacun. On doit tenir compte du temps de transport, mais il faut aussi éviter les autres possibilités d'exposition aux rayonnements. Cela considéré, lorsque l'activité totale des sources dans l'enceinte est faible, on peut transporter cette dernière à la main, au bout de longues pinces. Le matériel utilisé pour le transport des sources, doit être

marqué de fapon appropriée. Il doit rester sous surveillance ou être inaccessible aux personnes non autorisées.

d) On doit réserver un espace ou une pièce séparée pour la préparation des sources et des localisateurs. Seules les personnes qui participent à la préparation doivent être admises à cet endroit.

e) Lors de la préparation, de la stérilisation et du démontage des sources et des localisateurs, les écrans offrent une protection incomplète. Il est donc nécessaire d'utiliser des outils appropriés, afin de réduire au minimum l'irradiation du corps. Ces outils doivent être conçus de façon à assurer la meilleure combinaison des facteurs temps et distance. Le personnel devra essayer avec de fausses capsules (clairement identifiées comme telles), jusqu'à obtention d'un haut niveau de dextérité.

f) Les tables utilisées pour la manipulation des sources doivent offrir une protection pour l'opérateur et ses assistants. Un bloc de plomb ou d'un autre métal lourd, en forme de L, réduira l'irradiation du corps et des jambes de l'opérateur, mais il faut aussi penser à protéger les mains, les bras et le visage, contre une surexposition.

g) Pendant l'irradiation d'un patient, la distance et le temps d'exposition sont les facteurs de radioprotection les plus importants. On doit utiliser des instruments et des dispositifs d'implants appropriés.

h) Les patients, alités ou non, doivent être isolés dans des cabines ou des chambres, aux soins d'un personnel ayant suivi une formation appropriée. Le lit, la cabine ou la chambre doivent être marqués d'un signe spécial pendant l'irradiation.

i) Les patients portant des sources amovibles internes ou externes ne doivent pas quitter l'hôpital ou la clinique.

j) La protection des autres patients et du personnel doit être prise en considération.

11.3.2 Thérapie par faisceau (téléthérapie)

1. La source doit être placée dans une enceinte protectrice appropriée.

2. On recommande l'utilisation de capsules standard.

3. Le mécanisme de commande doit permettre l'utilisation du faisceau quelle que soit l'orientation de l'enceinte. En plus du dispositif d'arrêt automatique, l'appareil doit pouvoir être éteint manuellement, avec un risque minimal d'exposition.

4. Le mécanisme d'arrêt doit être conçu de façon à revenir automatiquement à la position "arrêt" à la fin de l'exposition et en cas de panne ou d'interruption de l'alimentation. Il doit rester à la position "arrêt", lorsque l'alimentation est rétablie, jusqu'à ce qu'on le remette en marche depuis le bloc de commande.

5. Le mécanisme de commande du faisceau doit comporter une minuterie qui arrête automatiquement l'irradiation après un temps prédéterminé.

6. Des témoins indiquant clairement si l'appareil est en service ou non doivent être placés sur l'enceinte, sur le bloc de commande et à l'entrée des salles de téléthérapie.

7. Pendant l'irradiation, seul le patient est admis dans la salle de traitement. À tout autre moment, la salle ne doit être occupée qu'à des fins d'opération et d'entretien du dispositif.

8. On doit disposer d'un système de sécurité qui éteint le faisceau lorsque la porte de la salle de traitement s'ouvre.

9. On doit pouvoir observer le patient et communiquer oralement avec lui depuis le bloc de commande, pendant le traitement.

# 12. RÈGLES DE SÉCURITÉ APPLICABLES AUX INSTALLATIONS À RAYONS X

## 12.1 Règles générales

### A. Écrans et barrières de protection

1. Des écrans et des barrières de protection doivent être installés de telle sorte que le personnel travaillant avec les rayons X ne reçoive pas plus de 100 mrem/semaine lorsque le dispositif fonctionne à plein régime.

2. Le personnel affecté à d'autres tâches, à proximité du dispositif à rayons X, doit être adéquatement protégé et ne doit pas recevoir plus de 10 mrem/semaine lorsque le dispositif fonctionne à plein régime.

3. On doit tenir compte du facteur d'occupation dans le calcul de la dose cumulée. Il faut aussi considérer la charge de travail dans le laboratoire et tout développement futur. On doit tenir compte de la diffusion par le patient, mais négliger l'atténuation. On peut assouplir les normes de construction en plaçant les tubes dans des enceintes protectrices et en restreignant les orientations possibles du faisceau utile.

4. Le bloc de commande du dispositif à rayons X doit être placé dans une cabine séparée, installée de telle sorte que le rayonnement soit diffusé au moins deux fois avant de pénétrer dans la cabine. Une fenêtre doit permettre l'observation sans problème du patient, pendant le diagnostic ou le traitement.

5. Pour un dispositif fonctionnant à 125 kVc ou plus, on ne doit pas se contenter d'écrans amovibles.

6. En ce qui concerne les barrières de protection, on doit s'assurer que les joints, les clous et les boulons ne réduisent pas la protection. À ces endroits, on doit prévoir un chevauchement convenable du matériau protecteur. Lorsque des trous doivent être percés pour des tuyaux, des conduites, des ouïes, etc., on doit prévoir des chicanes, afin de ne pas diminuer la protection.

7. Sauf lorsque le travail normal l'oblige, on ne doit pas ouvrir les portes d'une salle de radiologie qui communiquent avec d'autres locaux occupés.

8. Dans le cas d'installations importantes, lorsqu'il y a plusieurs tubes à rayons X différents, on doit tenir compte de la possibilité d'expositions multiples.

9. Le type de matériau et les dimensions de toutes les barrières protectrices doivent être indiqués sur les plans définitifs d'une installation. Les positions de toutes les fenêtres, portes, conduites et ouïes doivent aussi être indiquées, dans la mesure où elles ont des incidences sur les règles de sécurité.

B. Contrôles

1. L'opération normale d'une installation à rayons X doit être différée jusqu'à ce qu'on ait procédé à un contrôle de rayonnement.

2. On doit procéder à un contrôle chaque fois qu'il y a eu un changement dans les conditions de travail ou dans les barrières de protection.

3. On doit aussi vérifier périodiquement que les niveaux de rayonnement restent dans les limites prescrites.

4. Lors d'un contrôle, on doit inspecter tout le matériel de protection (gants, tabliers, etc.), les dispositifs de verrouillage et le matériel d'avertissement. On doit aussi revoir les techniques utilisées et, au besoin, faire des recommandations pour réduire au minimum les dangers des rayonnements. Il faut également vérifier les techniques de surveillance individuelle.

5. Des mesures de rayonnement doivent être effectuées à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la zone concernée. Tout défaut doit être corrigé avant que l'installation soit mise en service.

C. Protection du personnel

1. Seules des personnes qualifiées, ou des personnes travaillant sous la supervision directe d'une personne qualifiée, doivent faire fonctionner le dispositif à rayons X.

2. Le personnel travaillant dans le voisinage d'un dispositif à rayons X et susceptible d'être exposé au rayonnement doit porter un dosimètre.

D. Protection du patient

1. Aucun examen aux rayons X ne doit être entrepris sans indication précise d'un médecin. Il faut déterminer si des examens radiologiques précédents ne rendent pas tout examen supplémentaire superflu.

2. Il doit y avoir consultation entre le médecin et le radiologue avant que des examens radiologiques complets ou répétés soient entrepris sur de jeunes personnes.

3. Les femmes enceintes doivent faire l'objet de précautions spéciales. Pendant la grossesse, on doit procéder seulement aux examens essentiels, et l'on doit éviter, dans la mesure du possible, d'irradier le foetus. Lorsqu'on effectue des radiographies dans la région pelvienne sur des femmes en âge de procréer, il ne faut pas négliger la possibilité d'un début de grossesse.

E. Autres

1. Des avertissements doivent être affichés sur la porte de la salle à rayons X: "RAYONS X - DÉFENSE D'ENTRER".

2. On doit tenir des dossiers permanents sur toutes les expositions.

3. Les dispositifs produisant plus de 1000 rad/min, placés dans des endroits accessibles, ne doivent pas être laissés sans surveillance sans que le courant soit coupé à la source principale.

12.2 Dispositifs de radiodiagnostic médical

A. Règles générales

1. Matériel

a) Le tube doit être placé dans une enceinte protectrice conçue pour les diagnostics.

b) Les ouvertures, les cônes ou les obturateurs servant à limiter le faisceau utile doivent offrir la même protection que l'enceinte protectrice.

c) Dans la plupart des installations de diagnostic, une barrière de protection correspondant à une épaisseur de plomb de 0,16 cm, avec une hauteur de 2,13 m, est adéquate.

d) Le filtre total permanent doit être déterminé en fonction de la tension maximale de l'appareil à rayons X. Pour un tube dont la tension maximale est supérieure à 70 kVc, le filtre total permanent doit être équivalent à au moins 2 mm d'aluminium. Lorsque la tension maximale est plus faible, le filtre doit être équivalent à au moins 1,5 mm d'aluminium.

e) Dans la mesure du possible, on doit utiliser un interrupteur de rayonnement de sécurité.

f) On doit utiliser des compteurs photoélectriques ou des dispositifs similaires. Si cela n'est pas possible, il faut employer des minuteries précises.

g) On doit utiliser les films les plus rapides et des écrans permettant un diagnostic satisfaisant.

B. Procédures et techniques radiologiques

a) La dose totale reçue par le patient doit être minimale.

b) Il faut toujours limiter strictement le champ de rayonnement à la zone nécessaire, suivant l'examen ou le traitement particulier. Pour ce faire, il est préférable d'utiliser des diaphragmes plutôt que des cônes circulaires, surtout si le champ est de grandes dimensions.

c) Autant que possible, le faisceau ne doit pas être dirigé directement sur les gonades. Il est particulièrement important de se rappeler cela lors d'examens des membres (surtout lorsqu'on radiographie les mains d'un patient assis).

d) Des écrans appropriés doivent toujours être utilisés lors d'examens ou de traitements au cours desquels les gonades risquent d'être exposées à de fortes doses, à moins que cela ne nuise à l'examen.

e) Lors de l'examen d'enfants ou de patients ayant besoin d'assistance, l'immobilisation doit être assurée par des moyens mécaniques. Au besoin, les enfants seront tenus par leurs parents ou par des assistants n'appartenant pas au personnel de la salle de radiologie. Ces personnes doivent recevoir une protection adéquate, surtout en ce qui concerne les gonades et les mains (écrans de plomb, tabliers et gants).

C. Radioscopie

1. Matériel

a) Le tube à rayons X et l'écran radioscopique doivent être placés de telle sorte que l'écran ne puisse pas être déplacé en dehors du faisceau utile.

b) L'écran radioscopique doit être recouvert d'un verre protecteur équivalent à une épaisseur de plomb d'au moins 2,0 mm pour des rayons X de 100 kVc. Entre 100 et 150 kVc, on doit ajouter l'équivalent de

0,01 mm de plomb par kilovolt. (Cela inclut l'atténuation par le patient). Les intensificateurs d'image doivent offrir la même protection.

c) Un interrupteur commandant le faisceau de rayons X doit pouvoir être actionné à partir de l'écran radioscopique.

d) On doit disposer d'une minuterie cumulative, remontable manuellement, qui indique le temps total d'irradiation ou qui interrompt l'irradiation lorsqu'un temps total prédéterminé est atteint.

e) Toutes les banquettes et tous les supports utilisés en radioscopie doivent être disposés de telle sorte que l'opérateur et ses assistants soient protégés contre le rayonnement diffusé (en particulier par le patient et par les bords de la table). On peut fixer un tablier à l'écran ou à la banquette de façon à obtenir une protection maximale. Ce tablier doit couvrir une surface minimale de 45,72 cm carrés et doit être équivalent à au moins 0,5 mm de plomb.

f) On recommande l'utilisation d'un interrupteur à intensité variable. Le courant de faible intensité est utilisé pour localiser la zone à examiner et le courant de forte intensité est utilisé pour une exploration rapide.

g) On ne doit pas utiliser d'appareil de radioscopie dit "manuel".

2. Procédures et techniques radiologiques

a) La distance entre le foyer et la peau doit être d'au moins 45 cm (18 pouces) pour des tensions supérieures à 100 kVc ou 30 cm (12 pouces) pour des tensions inférieures à 100 kVc.

b) Pour des tensions allant jusqu'à 100 kVc, on doit porter un tablier et des gants protecteurs pendant la radioscopie. Les gants doivent couvrir toute la main (dos, paume, doigts et poignet). Le tablier et les gants doivent être équivalents à une épaisseur de plomb d'au moins 0,25 mm, et l'on doit vérifier régulièrement s'ils ne sont pas déchirés.

c) Avant d'entreprendre un examen radioscopique, on doit adapter sa vue à l'obscurité. Afin de travailler avec le débit de dose le plus bas possible, on doit prévoir un temps d'adaptation d'au moins 10 minutes.

d) Pour les radioscopies courantes, le débit d'exposition mesuré au bloc de commande ou au support du patient doit être aussi bas que possible et ne doit pas excéder 10 rem/min.

e) On ne doit pas entreprendre une radioscopie lorsqu'on peut obtenir les mêmes renseignements avec une radiographie.

D. Radiographie avec un équipement fixe

1. On doit utiliser un localisateur lumineux pour délimiter la section du faisceau utile.
2. Un dispositif doit permettre d'interrompre l'irradiation après un temps prédéterminé.
3. L'exposition aux rayons X doit être commandée à partir du bloc de commande seulement, sauf dans les cas où l'on utilise des techniques spéciales et où il faut commander l'irradiation à partir du support du patient.
4. L'opérateur doit pouvoir observer le patient depuis le bloc de commande sans avoir à quitter la zone protégée.
5. On ne doit pas examiner plus d'un patient à la fois dans une même salle.

E. Radiographie avec un équipement mobile

1. Tout appareillage mobile doit être équipé de collimateurs coniques ou de diaphragmes et de cadres de localisation afin d'assurer une distance entre le foyer et la peau d'au moins 30 cm (12 pouces) et un faisceau utile aussi étroit que l'examen le permet.
2. L'opérateur doit se trouver à au moins 1,5 m (6 pieds) du tube et du patient.
3. L'opérateur doit prendre toutes les précautions pour s'assurer que personne, à proximité du dispositif à rayons X, n'est irradié.
4. On ne doit pas entreprendre de radioscopie si les règles de sécurité énoncées au paragraphe 12.2, section C, ne sont pas satisfaites.
5. Pour un patient, à une distance de 30 cm, le débit de dose ne doit pas dépasser 10 rem/min.

F. Radiophotographie (radiographie systématique)

1. Un collimateur doit limiter le faisceau utile à la surface de l'écran fluorescent. Un localisateur lumineux doit être utilisé à cette fin.

2. La protection doit être suffisante pour que le personnel travaillant à proximité de l'installation n'ait pas besoin de porter des vêtements protecteurs.

3. On recommande l'utilisation de systèmes optiques ultrarapides qui permettent de réduire la dose reçue par le patient.

4. On ne doit pas utiliser des techniques systématiques miniatures pour l'examen thoracique des femmes enceintes.

5. On ne doit pas utiliser des techniques systématiques miniatures pour l'examen thoracique des enfants ou des adultes de petite taille, à moins de disposer d'un équipement spécial pour protéger les gonades.

6. Afin de réduire la dose reçue par la population en général, on doit penser à la protection des personnes qui attendent d'être examinées.

G. Radiographie dentaire

1. Toutes les installations dentaires doivent être équipées de localisateurs coniques. Ces cônes assurent une distance entre le foyer et la peau aussi grande que possible (au moins 10 cm jusqu'à 50 kVc et au moins 17,5 cm au-delà), et un faisceau aussi étroit que possible (au plus, 7,5 cm de diamètre).

2. On doit utiliser une minuterie pour interrompre l'exposition après un temps prédéterminé. Le fil de la minuterie doit être assez long pour permettre à l'opérateur de rester en dehors du faisceau principal.

3. Lorsque l'installation fonctionne sous une tension maximale allant jusqu'à 70 kVc, l'opérateur doit pouvoir se tenir à un mètre au moins du tube et du patient (au moins 1,5 mètre à 70 kVc et plus).

4. Pour des installations dépassant 30 mA.min/semaine, on doit utiliser des écrans protecteurs d'une épaisseur équivalente au moins à 0,5 mm de plomb.

5. Les personnes travaillant à proximité doivent être protégées, surtout si plus d'un tube fonctionne au même endroit.

6. Autant que possible, le film doit être maintenu en place. Il peut être tenu par le patient ou par une autre personne accompagnant le patient, pourvu que cette personne ne soit pas elle-même professionnellement exposée aux rayonnements. Le film ne doit jamais être tenu en place par le dentiste ou ses assistants. Ces derniers ne doivent, en aucune circonstance, s'exposer au faisceau utile.

7. On ne doit pas procéder à des radioscopies avec l'équipement dentaire.

8. Pour un équipement fonctionnant sous une tension inférieure à 70 kVc, la filtration permanente totale doit être équivalente à 1,5 mm d'aluminium.

9. L'interrupteur d'irradiation doit être du type de sécurité.

10. L'enceinte du tube ou le cône dentaire ne doivent pas être tenus à la main pendant l'irradiation.

11. On doit porter un tablier de plomb et un écran pour l'irradiation de la glande thyroïde.

12.3 Installations de radiothérapie

A. Règles générales

1. Le tube doit être placé dans une enceinte protectrice de type thérapeutique.

2. Les diaphragmes permanents ou les cônes utilisés comme collimateurs doivent offrir le même degré de protection que l'enceinte. Les diaphragmes réglables ou amovibles ne doivent pas transmettre plus de 5 pour cent du faisceau utile.

3. L'épaisseur et le matériau des filtres doivent être indiqués clairement sur tous les filtres amovibles. On doit pouvoir lire ces indications depuis le bloc de commande.

4. La position du foyer doit être indiquée sur l'enceinte du tube.

5. À moins qu'il soit possible d'obtenir rapidement le rayonnement X désiré, l'enceinte doit être munie d'un obturateur commandé électriquement depuis le bloc de commande dont l'épaisseur équivalente de plomb égale celle de l'enceinte. La position de l'obturateur doit être indiquée sur le bloc de commande.

6. L'installation doit être pourvue d'une minuterie automatique interrompant le traitement après un temps prédéterminé.

7. On doit pouvoir observer le patient et communiquer oralement avec lui pendant le traitement, depuis le bloc de commande.

8. Les installations fonctionnant sous des tensions supérieures à 100 kVc doivent être munies d'un système de verrouillage qui coupe automatiquement l'alimentation dès qu'une porte de la salle de traitement est ouverte. La tension ne pourra être rétablie que depuis le bloc de commande.

9. On recommande de placer un moniteur de transmission dans le faisceau utile, afin de vérifier la constance du rayonnement. Des tables d'étalonnage donnent le débit de dose du faisceau utile pour des valeurs données de tension, de courant, de filtration, de taille de localisateur et de distances foyer-peau. Ces tables doivent faire l'objet de fréquentes vérifications avec une chambre d'ionisation.

10. Lorsque les installations fonctionnent sous des tensions supérieures à 100 kVc, seul le patient doit être admis dans la salle de traitement pendant l'irradiation.

# 13. PRINCIPES DE RADIODÉTECTION

## 13.1 Introduction

Contrairement à la lumière et à la chaleur, les rayonnements ionisants ne peuvent être détectés par les sens. C'est donc avec des instruments spéciaux que l'on peut détecter et mesurer différents types de rayonnements émis par des matières radioactives, des dispositifs à rayons X, des accélérateurs de particules et des réacteurs nucléaires.

## 13.2 But des mesures

Les instruments de mesure des rayonnements sont utilisés dans différents buts que l'on peut classer dans les principales catégories suivantes:

a) instruments de laboratoire pour mesurer la radioactivité d'un échantillon;

b) instruments de contrôle pour mesurer le débit d'exposition dans un champ de rayonnement;

c) instruments de surveillance individuelle pour mesurer l'exposition totale cumulée.

## 13.3 Méthodes de mesure

La détection des rayonnements est basée sur plusieurs principes. Les plus répandus sont:

1. collection électrique des ions,
2. détection photographique,
3. scintillation de cristaux,
4. décomposition chimique,
5. détecteurs fluorescents et thermoluminescents,
6. détecteurs calorimétriques,
7. réactions nucléaires et de recul en dosimétrie neutronique.

## 13.4 Collection électrique des ions

La grande majorité des instruments de détection des rayonnements sont basés sur le principe de la collection des ions formés dans un gaz. Les plus communs sont:

1. les chambres d'ionisation,
2. les tubes compteurs proportionnels,
3. les tubes compteurs Geiger.

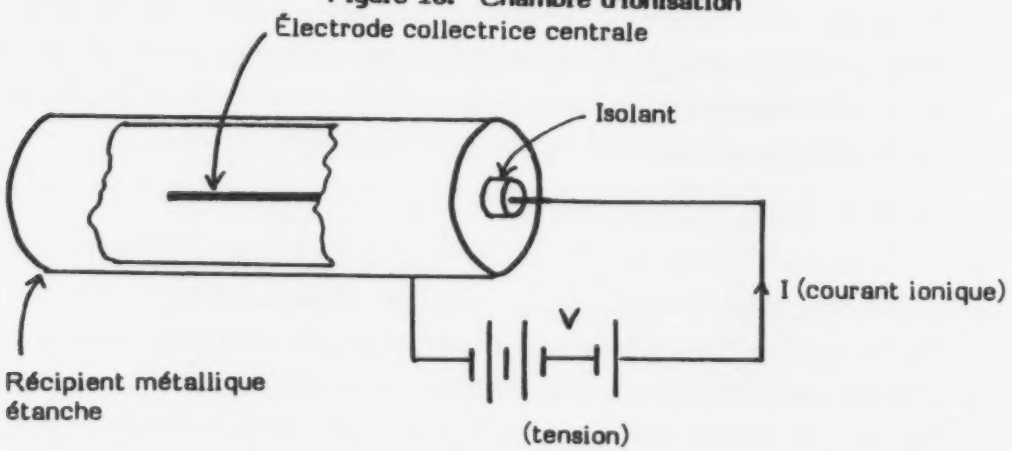
13.4.1 Les chambres d'ionisation

L'interaction d'un rayonnement avec un gaz produit des ions. Ces ions finissent par se recombiner. Cependant, en présence d'un champ électrique, les ions ont tendance à être attirés par les surfaces de charge opposée. C'est le principe de la chambre d'ionisation.

Une chambre d'ionisation est essentiellement constituée d'un récipient cylindrique muni d'une électrode centrale et remplie de gaz, en général de l'air à température et pression normales. Une tension est appliquée entre l'enveloppe externe et l'électrode centrale. Les ions sont attirés vers les surfaces de charge opposée et un courant est alors établi.

Lorsque l'on augmente la tension, le nombre d'ions qui tendent à se recombiner diminue, jusqu'au moment où tous les ions produits sont collectés par l'électrode. La chambre fonctionne alors en état de saturation. L'intensité du courant dans la chambre est directement proportionnelle à l'ionisation, donc à l'intensité du rayonnement.

**Figure 18. Chambre d'ionisation**




La tension de fonctionnement d'une chambre d'ionisation varie habituellement entre 60 et 300 volts, selon la taille de la chambre et le gaz qu'elle contient. Les instruments basés sur ce principe sont peu sensibles car ils mesurent seulement la première ionisation. C'est aussi pour cette raison qu'ils mesurent des champs de rayonnements intenses. Ils ne permettent pas d'identifier les types de rayonnements.

13.4.2 Les tubes compteurs proportionnels

Si la tension augmente au-delà de la valeur de saturation, les ions en mouvement vers les électrodes gagnent assez d'énergie pour provoquer une ionisation secondaire, donnant ainsi naissance à un plus grand nombre d'ions. À chaque paire d'ions produite par le rayonnement initial, correspond un nombre beaucoup plus élevé d'ions reçus par les électrodes. On appelle ce phénomène "amplification due au gaz". Une élévation de la tension entraîne une augmentation du facteur d'amplification. L'amplitude de l'impulsion enregistrée par l'instrument est donc proportionnelle à la tension et au nombre d'ions primaires qui se forment lorsque la tension est maintenue constante. L'amplitude de l'impulsion renseigne sur la différence d'ionisation, donc sur le type de rayonnement. Par exemple, une particule alpha, qui provoque une ionisation intense, produira une impulsion plus importante qu'un photon gamma, qui produit seulement quelques ions primaires.

La région de fonctionnement d'une chambre d'ionisation s'appelle "la région de proportionnalité". Dans les tubes compteurs proportionnels, les facteurs d'amplification peuvent aller jusqu'à $10^6$. Les instruments proportionnels sont très sensibles et leur domaine d'utilisation est étendu. Ils distinguent très bien les rayonnements alpha des rayonnements bêta. Les tubes compteurs disponibles sur le marché contiennent de l'argon, du méthane ou un mélange des deux, bien que l'air soit quelquefois utilisé. Ils fonctionnent sous des tensions variant ente 500 et 5000 volts.

13.4.3 Les tubes compteurs Geiger-Mueller

Si l'on continue d'augmenter la tension, le facteur d'amplification dû au gaz devient de plus en plus grand, ce qui provoque une véritable avalanche d'électrons sur l'anode de la chambre. L'amplitude de l'impulsion résultante est relativement indépendante de l'ionisation spécifique de la particule ou du photon qui a amorcé la réaction. La chambre fonctionne alors dans la région dite de Geiger-Mueller. Le facteur d'amplification peut atteindre $10^{10}$. L'instrument est très sensible et peut détecter un rayonnement produisant seulement une paire d'ions. À cause de cette caractéristique, on ne peut pas utiliser un tube Geiger pour distinguer des rayonnements d'énergies différentes.

Des rayonnements secondaires peuvent être émis lors de la décharge des ions positifs à la cathode d'un tube Geiger. Cela peut provoquer des impulsions secondaires

ou même une décharge continue dans le tube. Il existe plusieurs façons d'éviter ce phénomène.

Les tubes Geiger sont généralement remplis d'un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium, sous une pression d'environ 0,1 atmosphère. Sitôt après une décharge, il faut couper la tension pour permettre la détection d'autres particules. Ce coupage peut être réalisé par un circuit électronique dans lequel la haute tension est interrompue immédiatement après la décharge. On utilise maintenant des tubes autocoupeurs dans lesquels un gaz de coupage est mélangé à l'argon. On a aussi découvert que les halogènes sont de très bons gaz de coupage, et on les utilise maintenant de préférence aux gaz organiques car ils allongent la vie des tubes. À cause de ce coupage, le tube G-M ne fonctionne pas pendant un très court intervalle, après chaque impulsion. C'est ce qu'on appelle le "temps mort". Le temps mort ne devient un facteur important que lorsque les taux de comptage sont élevés.

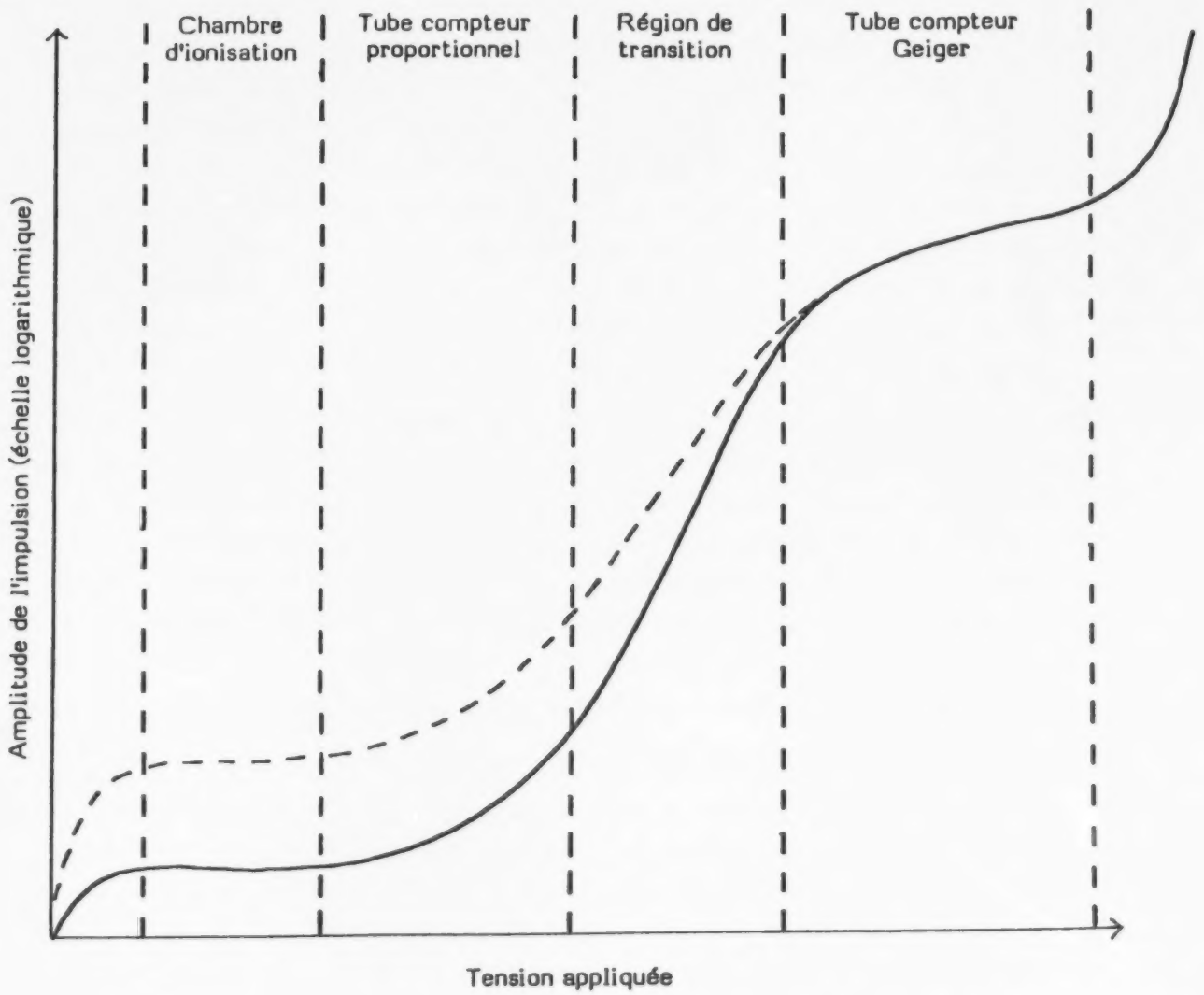
Un tube Geiger fonctionne dans la région indiquée sur la Figure 15. Cette région comporte une partie horizontale, appelée "plateau de Geiger", dans laquelle une variation de tension ne modifie pas le taux de comptage. Il est généralement préférable de faire fonctionner un tube Geiger approximativement au centre du plateau. Au-delà du plateau de Geiger se trouve la région de décharge continue (la décharge se poursuit après la décharge initiale). Ce phénomène, s'il n'est pas interrompu, risque d'endommager le tube. Les tubes que l'on trouve dans le commerce fonctionnent sous des tensions variant entre 1000 et 3000 volts.

## 13.5 La détection photographique

Le noircissement d'une émulsion photographique a été la première méthode de détection des rayonnements nucléaires. Lorsqu'un rayonnement frappe un film photographique, il ionise les halogénures d'argent présents dans l'émulsion. L'effet est si faible que le film exposé ne présente aucun changement visible. Néanmoins, au cours du développement, l'image latente est transformée en un dépôt noir d'argent métallique. Ce noircissement peut renseigner sur le type, l'énergie et la quantité de rayonnement que reçoit le film.

Les méthodes photographiques de détection et de mesure des rayonnements se révèlent très utiles pour la recherche de traces nucléaires. Cependant, on les utilise surtout en radiographie (diagnostics aux rayons X) et en autoradiographie (détermination de la position exacte d'un radio-isotope dans une structure complexe).

**Figure 19. Variation de l'amplitude de l'impulsion en fonction de la tension appliquée**



## 13.6 Scintillation de cristaux

Certaines substances, lorsqu'elles sont frappées par un rayonnement, transforment une partie de l'énergie absorbée en lumière visible. Ces substances sont appelées "phosphores". Il existe de nombreux phosphores naturels. Beaucoup de minerais et minéraux deviennent fluorescents lorsqu'ils sont exposés à la lumière ultraviolette. Les cristaux d'iodure de sodium contenant de petites quantités d'impuretés possèdent d'excellentes propriétés de scintillation. Chaque fois qu'un photon gamma frappe un tel cristal, il y a émission d'un photon lumineux. L'amplitude de cette impulsion lumineuse est proportionnelle à l'énergie du rayonnement, pour une grande gamme de rayonnements. De plus, l'iodure de sodium laisse passer la lumière émise qui peut être détectée par un appareil placé à proximité. Dans un compteur à scintillations, le cristal scintillant est monté sur un tube photomultiplicateur, le tout étant scellé et étanche à la lumière.

Le tube photomultiplicateur est constitué d'une photocathode et d'un certain nombre de dynodes. Une onde lumineuse pénétrant dans le tube frappe la photocathode et arrache des électrons dont le nombre est proportionnel à l'intensité de la lumière. Les dynodes sont portées à des tensions différentielles croissantes de telle sorte que le mouvement des électrons d'une dynode à l'autre est accéléré et amplifié. On obtient ainsi une impulsion d'énergie appréciable à la sortie du photomultiplicateur. Cette impulsion peut être encore amplifiée et transmise à un compteur.

On utilise différents types de "phosphores". L'iodure de sodium est couramment employé pour les rayonnements gamma; le sulfure de zinc activé à l'argent convient très bien pour les particules alpha. Pour produire l'impulsion lumineuse nécessaire, ce dernier cristal doit transférer une grande quantité d'énergie. Il est donc insensible à la plupart des rayonnements autres que les particules alpha. L'anthracène convient à la mesure du rayonnement bêta, mais on peut aussi utiliser d'autres substances comme le naphtalène et le stilbène. On utilise de plus en plus des plastiques transparents, imprégnés d'un "phosphore", à différentes fins.

Les détecteurs à scintillation ont un certain nombre d'avantages sur les chambres d'ionisation.

A. Possibilité de détecter différents types de rayonnements en changeant le phosphore.

B. Très grande sensibilité, surtout pour les rayonnements gamma.

C. Possibilité de mesurer des activités élevées, sans temps mort.

D. Possibilité d'utilisation comme spectromètres pour la détermination des énergies des rayonnements incidents.

13.7 La décomposition chimique

Un rayonnement provoque l'ionisation et, dans certains milieux, cette ionisation peut entraîner des réactions en chaîne. Les réactions en chaîne dans un système chimique jouent le même rôle qu'un amplificateur dans un circuit électrique.

Il existe différents types de réactions chimiques provoquées par un rayonnement. Les principaux sont:

a) réactions d'oxydo-réduction,
b) variations du pH d'une solution,
c) déclenchement de réactions de polymérisation.

Le dosimètre de Fricke illustre bien le premier type de réaction. Du sulfate ferreux en solution se transforme en sulfate ferrique après absorption d'un rayonnement. La quantité de sulfate ferrique produit est proportionnelle à la quantité de rayonnement absorbé et elle peut être déterminée par la mesure de l'absorption d'une certaine longueur d'onde lumineuse (305 mμ).

Un indicateur ordinaire de décomposition chimique consiste en un mélange de chloroforme et d'eau qui produit de l'acide chlorhydrique en quantité proportionnelle au rayonnement absorbé. Des indicateurs incorporés peuvent donner la variation correspondante de pH.

Les rayonnements peuvent provoquer la polymérisation de la plupart des monomères. Ils peuvent aussi entraîner la dégradation de polymères. En principe, ces deux types de réactions peuvent être utilisés pour mesurer des doses de rayonnement. Le premier phénomène a généralement comme conséquence une plus grande viscosité de la solution de manomère. Une mesure de la viscosité donne une indication directe de la dose de rayonnement. Les possibilités offertes par cette méthode dosimétrique sont illimitées.

Les dosimètres chimiques peuvent être très précis lorsqu'il s'agit de mesures de dose absorbée. Ces instruments sont insensibles aux faibles doses de rayonnement et ils ne permettent pas une détermination rapide des débits de dose. Ce sont surtout des outils de recherche servant à l'étalonnage d'autres types d'instruments.

## 13.8 Les détecteurs fluorescents et thermoluminescents

### 13.8.1 Les dosimètres fluorescents

Certains matériaux soumis à un rayonnement ionisant emmagasinent l'énergie absorbée et la libèrent sous forme de lumière lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement ultraviolet. On appelle ce phénomène "radiophotoluminescence". La quantité d'énergie émise sous forme de lumière visible est proportionnelle à l'exposition initiale aux rayonnements ionisants et peut donc être utilisée en dosimétrie.

Les verres au phosphate activés à l'argent, qui sont utilisés dans les instruments disponibles dans le commerce, permettent de mesurer jusqu'à 100 000 rad. Des dosimètres récemment mis au point peuvent mesurer des doses aussi faibles que 30 mR. L'utilisation de ces dosimètres nécessite des instruments spécialement conçus et étalonnés.

### 13.8.2 Les dosimètres thermoluminescents (voir le Chapitre 14)

Ces dosimètres ressemblent beaucoup aux dosimètres à verre phosphaté. La luminescence n'est pas provoquée par la lumière ultraviolette, mais en chauffant le "phosphore" à une température donnée. Le fluorure de lithium convient très bien et il est habituellement employé sous forme de poudre enfermée dans une petite capsule. Ce type de dosimètre nécessite aussi un instrument de lecture complexe.

## 13.9 Détermination calorimétrique

L'énergie de rayonnement absorbée par un matériau est finalement transformée en chaleur. L'élévation de température d'un matériau irradié peut donc servir à mesurer une dose de rayonnement. Ce procédé est très peu sensible et difficile à utiliser car l'absorption de 100 rad/min entraîne, dans un matériau de chaleur spécifique unitaire, une élévation de température de seulement $2{,}5 \times 10^{-4}$ °C/min.

## 13.10 Réactions nucléaires et de recul (Dosimétrie neutronique)

Les neutrons n'ionisent pas les matériaux qu'ils traversent et ils ne sont pas eux-mêmes chargés électriquement. Les principes de détection dépendent donc de réactions secondaires. De plus, la nature de leur interaction avec la matière dépend beaucoup de leur énergie cinétique. Les principes varient donc selon la gamme d'énergie.

En pratique, on appelle neutrons lents ceux dont l'énergie cinétique est inférieure à 20 kV. Tous les autres sont des neutrons rapides.

13.10.1 Les neutrons lents

L'interaction des neutrons lents avec la matière consiste en réactions de capture. Dans le corps humain, les réactions importantes sont:

$$^{1}H + {}^{1}n \longrightarrow {}^{2}D$$
$$^{14}N + {}^{1}n \longrightarrow {}^{14}C + {}^{1}H$$

Les neutrons lents réagissent avec le bore-10 pour produire du lithium-7 de la façon suivante:

$$^{10}B + {}^{1}n \longrightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He$$

Les noyaux d'hélium rapides (ou particules alpha) provoquent une ionisation intense et peuvent ainsi être détectés. Pour détecter les neutrons lents, on peut utiliser un détecteur de rayonnement ionisant, garni de bore et rempli de trifluorure de bore, que l'on fait fonctionner dans la région de proportionnalité.

Pour détecter un grand nombre de neutrons lents, on procède par activation de feuilles métalliques. Certains matériaux, comme l'or, qui ont de grandes sections efficaces de capture, deviennent radioactifs, ce qui permet la détection. Certains radio-isotopes de courte période conviennent très bien. Une réaction similaire produit du sodium-24 à partir du sodium-23 naturel. Le sodium étant l'un des constituants du sang, on utilise cette réaction pour mesurer les irradiations massives du corps humain.

13.10.2 Les neutrons rapides

Les neutrons rapides perdent leur énergie en entrant en collision avec d'autres atomes. Les matériaux contenant une grande proportion d'hydrogène sont les plus efficaces pour ralentir les neutrons. On utilise couramment l'eau et la paraffine.

Pour détecter les neutrons rapides, on peut compter les protons de recul produits par collision avec les neutrons à l'aide d'un détecteur de rayonnement ionisant entouré de paraffine. En employant un détecteur d'amplitude d'impulsions qui fonctionne dans la région de proportionnalité, on peut identifier les pulsations engendrées par les protons.

Le tube compteur au fluorure de bore utilisé pour les neutrons lents peut aussi servir au comptage des neutrons rapides s'il est entouré de paraffine. Dans ce cas, les neutrons sont d'abord ralentis, puis ils entrent en réaction nucléaire avec le bore.

Les neutrons rapides peuvent être détectés et comptés à l'aide de films photographiques à émulsion nucléaire. Les protons de recul laissent dans le film des traces visibles au microscope.

Différentes réactions nucléaires ont été utilisées pour la détection des neutrons et l'estimation quantitative du rayonnement. Certaines consistent en des réactions de fission avec l'uranium naturel. D'autres sont des réactions de capture, comme celle qui se produit avec le soufre:

$$^{32}S + {}^{1}n \longrightarrow {}^{32}P + {}^{1}p$$

Cette dernière réaction a été utilisée pour déterminer la dose de neutrons rapides absorbée par l'homme. Dans ce cas, c'est la teneur en soufre des cheveux qui sert d'indicateur.

# 14. DOSIMÉTRIE INDIVIDUELLE

## 14.1 Introduction

Les instruments de surveillance individuelle sont conçus pour mesurer la dose cumulée absorbée par une personne. Ces instruments sont différents des instruments de contrôle qui, normalement, mesurent seulement le débit d'exposition au rayonnement.

Le Bureau de radioprotection offre, depuis 1951, un service de dosimétrie. Jusqu'à récemment, on utilisait un dosimètre photographique, mais, en 1976, on a introduit le système de dosimétrie par thermoluminescence (DTL). La thermoluminescence est une méthode efficace et sûre d'évaluation des expositions aux rayonnements, et la plupart des dosimètres individuels sont maintenant basés sur ce principe.

## 14.2 Dosimétrie individuelle

Un dosimètre individuel comprend normalement un détecteur et un support. Il est souhaitable que les dosimètres individuels présentent les caractéristiques suivantes:

a) la réponse est indépendante de l'énergie dans la gamme considérée; l'appareil est sensible à ce type de rayonnement;

b) la réponse est faible pour tout autre rayonnement (type et énergie);

c) l'enregistrement de la dose s'atténue lentement;

d) la dose est cumulée;

e) l'appareil est robuste, portatif; il peut être expédié par la poste et il ne peut être démonté;

f) l'identification est possible;

g) l'appareil est insensible à la direction du rayonnement incident et aux conditions ambiantes (humidité, température, luminosité, la présence de produits chimiques, ondes électromagnétiques et acoustiques);

h) la mesure de la dose est rapide.

A. Avantages

1. On dispose d'un relevé permanent des expositions reçues par l'utilisateur.
2. La gamme des mesures est étendue, depuis quelques mrem jusqu'à $10^3$ mrem.
3. L'appareil peut être réutilisé de nombreuses fois.
4. La lecture de la dose est possible 15 minutes après réception de la plaque.

B. Inconvénients

1. L'appareil est peu précis pour des expositions inférieures à 10 mrem.
2. L'appareil est sensible à la poussière et à la graisse.
3. L'appareil ne renseigne pas directement sur la contamination par des matières radioactives.

14.3 Le système de dosimétrie par thermoluminescence (DTL)

Les objectifs de ce service sont:

a) évaluer les doses individuelles reçues par les travailleurs exposés aux rayonnements et conserver les résultats sous une forme compatible avec les normes établies pour la protection de chaque travailleur;

b) transmettre aux organismes contractants des renseignements sur les doses reçues par chaque membre du groupe étudié;

c) porter à l'attention des administrateurs et des organismes fédéraux et provinciaux concernés les dossiers des travailleurs qui ont reçu une dose cumulée dépassant les limites recommandées, et les dossiers de ceux qui, à la suite d'un accident, ont fait l'objet d'une irradiation intense;

d) offrir un service par voie postale;

e) s'assurer que les évaluations des doses sont exprimées dans les mêmes unités, afin que les doses enregistrées puissent être additionnées;

f) fournir aux travailleurs un nombre suffisant de dosimètres individuels bien conçus.

14.3.1 Thermoluminescence et courbes de luminescence

Les matériaux thermoluminescents sont disponibles sous différentes formes, chacune ayant des avantages et des inconvénients en dosimétrie individuelle.

Des éclats bien tassés donnent des résultats plus uniformes que toute autre forme (poudre, tiges, etc.). Les éclats conviennent à la dosimétrie individuelle courante car ils sont réutilisables et faciles à manipuler.

Lors du passage d'un rayonnement ionisant à travers un éclat thermoluminescent, quelques électrons se détachent des atomes et des molécules du matériau. Les électrons libres peuvent être "piégés" là où il y a des impuretés (atomes étrangers), et ils peuvent rester indéfiniment dans cet état métastable, à la température ambiante. Si l'éclat est chauffé, les électrons "piégés" retournent à l'état fondamental avec émission possible de photons de lumière visible. Donc, pendant l'exposition, une partie de l'énergie de rayonnement est emmagasinée dans l'éclat, puis libérée lors d'un chauffage subséquent. L'énergie est libérée sous forme de lumière visible. Ce phénomène est appelé "thermoluminescence". La quantité totale de lumière émise pendant la période de luminescence est une mesure de la quantité de rayonnement reçue précédemment. La courbe de l'énergie lumineuse libérée en fonction de la température (pour un taux de chauffage constant) s'appelle la courbe de luminescence.

En dosimétrie individuelle par thermoluminescence, on utilise généralement la quantité globale d'énergie lumineuse (mesurée avec un photomultiplicateur). Normalement, les courbes de luminescence servent à la mise au point d'instruments de lecture, à la vérification de lots d'éclats et à des étalonnages périodiques.

La forme de la courbe de luminescence dépend de nombreux facteurs: taux de chauffage et uniformité du chauffage, conductibilité, taille et forme du "phosphore", qualité du rayonnement incident, passé de l'échantillon (irradiation, recuits), niveau d'exposition, caractéristiques des instruments enregistreurs et du tube photomultiplicateur, composition du matériau thermoluminescent, etc.

14.3.2 Dosimètres pour le corps entier et pour la peau

Le Bureau de radioprotection fournit deux types de dosimètres: un moniteur de dose au corps entier et à la peau, et un moniteur de dose aux extrémités du corps. Les mains, les bras, les pieds, les jambes ou la tête sont souvent plus près de la source de rayonnement que le reste du corps et sont donc plus exposés. Pour cette raison un dosimètre supplémentaire est quelquefois nécessaire.

Le dosimètre comprend une plaque et un support de plaque. La plaque est faite d'aluminium estampé, et a la même longueur et la même largeur que le dosimètre

photographique individuel. La plaque est percée de deux trous qui sont recouverts d'un adhésif spécial. Deux éclats de fluorure de lithium thermoluminescent sont placés sur cet adhésif (un sur chaque trou). Le support consiste en un manchon extérieur et en une pièce conçue pour recevoir la plaque selon une seule orientation.

Les moniteurs de dose au corps entier et à la peau doivent être portés à la taille ou au revers du veston. Pour les extrémités du corps, on peut porter un moniteur spécial. Il consiste en un anneau de plastique avec une cavité circulaire contenant l'éclat de fluorure de lithium thermoluminescent, et il est normalement porté au doigt.

14.4 Comparaison des qualités dosimétriques du fluorure de lithium thermoluminescent et des films photographiques

En dosimétrie individuelle, lorsqu'on le compare aux films photographiques, le fluorure de lithium TL présente à la fois des avantages et des inconvénients. Les aspects essentiels en matière de dosimétrie individuelle courante sont présentés dans le Tableau suivant.

| | Paramètres | Fluorure de lithium thermoluminescent | Film photographique |
|---|---|---|---|
| 1. | Équivalence tissulaire et dépendance énergétique de la réponse: | Numéro atomique efficace proche de celui de l'air et des tissus. L'étalonnage en roentgens, pour les rayons X et gamma, permet donc une évaluation en mrem à quelques % près de la dose tissulaire, pour une grande gamme d'énergie. | Numéro atomique efficace assez différent de celui de l'air et réponse plus dépendante de l'énergie que pour le fluorure de lithium. |
| 2. | Réponse aux rayons bêta et aux photons de faible énergie: | Facteur d'étalonnage pour les rayons gamma est valable pour les photons (± 20%), et pour les électrons jusqu'à 10 MeV. | Le facteur d'étalonnage varie beaucoup avec l'énergie. |
| 3. | Nombre de détecteurs nécessaires: | Deux détecteurs sont généralement suffisants: un pour la dose au corps entier et un autre pour la dose à la peau. | Il est nécessaire de placer des détecteurs à plus de deux endroits, pour une identification de l'énergie. |
| 4. | Exposition à un rayonnement mixte: | Précision de la mesure de dose: généralement ± 20% pour des mélanges d'électrons et de rayons gamma. | La précision varie beaucoup selon la composition du mélange. |
| 5. | Réponse aux UV: | Faible. | Très forte. |

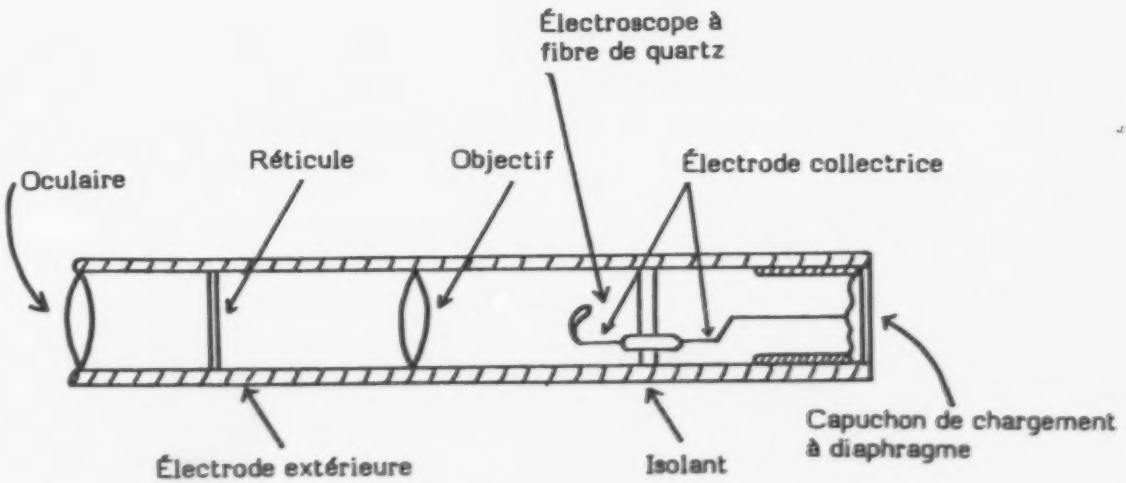
| | | | |
|---|---|---|---|
| 6. | Conditionnement spécial: | Pas important. | Essentiel. |
| 7. | Taille: | Petit. | Grand. |
| 8. | Gamme des doses: | Du millirem à $10^5$ rem. Précision faible pour des expositions inférieures à 10 mrem. | Du millirem à $10^3$ rem. Bonne précision pour des expositions inférieures en radiodiagnostic, mais faible avec les rayons gamma du Cs-137. |
| 9. | Affaiblissement de l'enregistrement: | Environ 5% en un an. Indépendant de la température et de l'humidité ambiantes. Convient à des périodes de surveillance s'étendant jusqu'à un an. | La période peut être inférieure à un an dans les conditions d'humidité et de température ambiantes. Ne convient pas pour de longues périodes de surveillance. |
| 10. | Effet du débit de dose: | Négligeable. | Négligeable. |
| 11. | Réutilisation: | Possible, de nombreuses fois. | Impossible. |
| 12. | Linéarité de la réponse: | Linéaire jusqu'à $10^3$ rem. Supralinéaire au-dessus de $10^3$ rem. | Nécessité de superposer plusieurs types de films, pour maintenir la linéarité jusqu'à $10^3$ rem. |
| 13. | Conservation de la mesure de dose après lecture: | Impossible. Les mesures de dose doivent être conservées dans des dossiers. | Possible pour de nombreuses années si l'on conserve avec soin les films exposés. |
| 14. | Diagnostic: | Limité, avec deux détecteurs. | Possible, avec plus de deux filtres appropriés sur des zones séparées du même film. |
| 15. | Interprétation de la dose par ordinateur: | Facile à cause de la linéarité, pour une grande gamme de valeurs de dose. | Compliquée à cause du manque de linéarité de la réponse en fonction de l'énergie. |
| 16. | Identification de la plaque: | Automatique. | Pas facile à rendre automatique. |
| 17. | Poussière et graisse: | Sensible. | Peu sensible. |
| 18. | Interférence avec le tritium: | Faible. | Forte. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 19. | Renseignements utiles: | Pas de renseignements directs sur la contamination par des matières radioactives. | Renseignements très clairs sur la contamination radioactive. Permet d'améliorer les pratiques de nettoyage. |
| 20. | Surveillance en cas d'urgence: | Lecture de la dose possible 15 minutes après réception de la plaque. | Lecture de dose possible quelques heures après réception du film. |
| 21. | Transport postal: | Possible. | Possible. |
| 22. | Rapidité du service: | Habituellement 24 heures après réception des dosimètres usagés. | Habituellement quelques jours après réception des dosimètres usagés. |

14.5 Dosimètre de poche

Le dosimètre de poche à lecture automatique est le plus utile des autres types de dosimètres individuels. Il ressemble à un stylo (il se porte de la même façon).

**Figure 20. Dosimètre de poche**




À l'intérieur du tube se trouvent une fibre de quartz et un fil, chacun en forme de U, reliés par les extrémités pour former un système conducteur. Un microscope incorporé, avec une échelle transparente, est mis au point sur le centre du U en fibre de quartz.

Lorsqu'une charge électrique est appliquée au système, la fibre de quartz est repoussée par le fil courbé (parce que deux corps de même charge se repoussent). Le dosimètre est maintenant chargé et l'échelle indique "zéro".

Une façon de décharger le dosimètre consiste à rendre l'air à l'intérieur du tube conducteur. Pour ce faire, on peut ioniser l'air par radiation. La décharge se traduit par un mouvement de la fibre de quartz qui a tendance à revenir à sa position initiale. La lecture du mouvement, sur l'échelle, donne une mesure de la quantité de rayonnement qui a causé l'ionisation.

Le principe de ce dosimètre est le même que celui de la chambre d'ionisation. Les avantages et les inconvénients suivent.

A. Avantages

1. Il est assez robuste et ne demande pas trop d'entretien.
2. Il est petit et peut être accroché facilement aux vêtements ou placé n'importe où sur le corps.
3. Il n'a pas besoin d'être protégé contre la pluie ou le soleil.
4. L'utilisateur peut le lire n'importe où et n'importe quand. Il est donc possible d'obtenir une indication de la dose reçue immédiatement après l'exposition.

B. Inconvénients

1. Il ne donne aucune indication sur le type de rayonnement.
2. Il a une capacité très limitée, habituellement inférieure à 1 roentgen.
3. Il ne conserve pas le résultat puisqu'il peut être chargé et déchargé à volonté.
4. Les possibilités d'erreurs dans les lectures sont nombreuses (s'il a été échappé sur le plancher, par exemple).

# 15. PRINCIPES ET MATÉRIAUX UTILISÉS POUR RÉDUIRE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS

Il existe certains principes fondamentaux de protection individuelle, quels que soient le type et l'énergie du rayonnement. Les principaux facteurs à considérer sont le temps d'exposition, la distance et le blindage. On doit rechercher la combinaison de ces facteurs la plus pratique et la plus économique, capable de fournir une protection adéquate.

## 15.1 Le temps

Dans de nombreux cas, le temps est la protection la plus efficace. Une bonne planification permet souvent de réduire le temps d'exposition à une source de rayonnement. On doit toujours adopter les techniques les plus rapides.

## 15.2 La distance

La distance est un facteur de protection très efficace. C'est quelquefois le plus simple et le plus économique. Les particules alpha et bêta ont une faible portée dans l'air, et la distance offre alors la protection la plus efficace. Pour ce qui est des rayons X et des rayons gamma, l'intensité décroît très rapidement avec la distance entre la source et le point considéré. La relation s'exprime par la loi de l'inverse des carrés qui s'écrit:

$$\frac{I}{I_o} = \frac{D_o^2}{D^2}$$

où $I_o$ est l'intensité initiale

$I$ est l'intensité au point considéré

$D_o$ est la distance initiale

$D$ est la distance au point considéré.

## 15.3 L'écran protecteur

L'écran protecteur est le plus important et le plus cher des trois facteurs de protection individuelle. Il permet l'utilisation de sources intenses ou importantes dans des lieux de travail où le personnel doit rester pendant de longues périodes. Le principe de l'écran est simple et des paramètres ont été introduits pour simplifier le calcul des épaisseurs nécessaires. Ce sont la CDA (couche de demi-absorption) et la CAD (couche d'atténuation au dixième). Il faut remarquer que ces paramètres varient lorsqu'un rayonnement pénètre dans un écran épais. Cette variation est due à une accumulation dans l'absorbant et au durcissement du faisceau. Ce dernier point

concerne particulièrement les faisceaux de rayons X. On peut, cependant, réduire considérablement les erreurs ainsi introduites en utilisant la CAD dans les calculs d'écrans épais.

15.3.1 Facteurs à considérer dans le calcul des écrans pour des installations à rayons X et à rayons gamma

A. Facteurs d'occupation (T)

Le terme facteur d'occupation s'applique à la fraction du temps qu'une personne doit passer dans un lieu donné. On trouve dans les manuels un certain nombre de facteurs d'occupation courants qui peuvent être utilisés dans le calcul des champs admissibles en différents endroits. Ces facteurs d'occupation sont les suivants:

1. Occupation totale (T = 1)

Ce facteur est utilisé dans les salles de commande, les bureaux, les salles d'attente assez grandes pour contenir des bureaux, les chambres noires, les ateliers, les infirmeries, les foyers, les résidences ou les salles de jeux.

2. Occupation partielle (T = 1/4)

Utilisé dans les couloirs trop étroits pour contenir des bureaux, les toilettes et les remises, les salons qui ne sont pas régulièrement occupés par des personnes professionnellement exposées, les ascenseurs et les parcs de stationnement non gardés.

3. Occupation occasionnelle (T = 1/16)

Peut être utilisé pour les placards, trop petits pour permettre une occupation éventuelle, les toilettes utilisées irrégulièrement, les cages d'escalier, les ascenseurs automatiques, les zones extérieures réservées à la circulation (piétons ou automobiles).

Le facteur d'occupation est une application pratique du "facteur temps". En réduisant le temps qu'une personne doit passer à un certain endroit, on peut augmenter l'intensité du champ de rayonnement admissible à cet endroit par un facteur approprié. Les limites professionnelles de 5 mrem/an, 100 mrem/semaine et 2,5 h sont toutes basées sur un facteur d'occupation égal à 1. Par exemple, on peut considérer que le facteur d'occupation dans un petit placard à

balais adjacent à une installation radiologique est égal à 1/16. L'intensité du champ admissible dans ce placard pourrait donc atteindre 40 mrem/h.

B. Facteur d'utilisation (U)

Dans certains cas, on utilise le terme "facteur d'utilisation" (U) dans le calcul des champs admissibles.

1. Utilisation totale (U = 1)

Ce facteur s'appliquerait au plancher, aux murs et au plafond d'une salle de radiologie, exposés en permanence au faisceau direct.

2. Utilisation partielle (U = 1/4) et (U = 1/16)

Ce facteur s'appliquerait aux murs, aux plafonds, etc. exposés au faisceau direct pendant seulement une partie du temps de travail. On doit tenir compte du facteur d'utilisation lors de la détermination de l'épaisseur des écrans de protection. Ce facteur est très utilisé en radiologie.

C. La charge de travail (W)

Un autre facteur à considérer est la charge de travail. Pour les installations radiologiques, elle s'exprime en mA x minute/semaine.

15.3.2 Matériaux protecteurs

Pour assurer le blindage des installations ou des appareils donnés, il faut tenir compte d'un certain nombre de facteurs importants qui influent sur le coût de l'installation. Le choix du matériau de blindage, l'emplacement de l'écran par rapport à la source de rayonnement, la disposition ou la forme de l'écran sont parmi ces facteurs importants. Nous nous limiterons ici à la comparaison de quelques matériaux protecteurs, parmi les plus courants.

A. Le plomb

Le plomb est sans aucun doute le matériau de protection contre les rayons X et les rayons gamma le plus connu et le plus répandu. À cause de son numéro atomique élevé (82), l'effet photoélectrique et l'effet Compton (qui sont les deux phénomènes les plus importants dans la gamme d'énergie qui nous intéresse) sont très efficaces, et la réduction du faisceau primaire est très grande. De plus, la dispersion est moins importante avec le plomb qu'avec les matériaux de numéro atomique plus petit.

Le plomb présente aussi des inconvénients. Parmi les principaux, on trouve son point de fusion assez bas et sa tendance au fluage à la température de la pièce. Les propriétés mécaniques du plomb sont donc médiocres et, lorsqu'on utilise ce matériau, il faut toujours prévoir un bon support. Cela est particulièrement vrai pour le revêtement des murs avec d'épaisses feuilles de plomb. Le tableau ci-dessous donne quelques-unes des constantes les plus importantes.

**Tableau 10. Constantes pour le plomb**

| | |
|---|---|
| Masse volumique | 11,34 $g/cm^3$ |
| $\mu$ (1,2 MeV) | 0,74 $cm^{-1}$ |
| Point de fusion | 621°F |
| CDA (Co 60) | 1,244 cm |
| CDA (Rayons X, 400 kVc) | 0,223 cm |
| CDA (Rayons X, 250 kVc) | 0,812 cm |
| CDA (Rayons X, 100 kVc) | 0,025 cm |

B. Le béton

Pour des installations et des sources importantes, le béton est probablement le plus économique et le plus pratique de tous les matériaux de blindage. C'est un bon matériau de construction, il résiste bien au fluage, il ne fond pas et on peut facilement lui faire prendre presque toutes les formes désirées. Des blocs de béton ou deux murs de béton séparés par du sable ou des pierres peuvent aussi offrir des avantages. Le seul inconvénient du béton est qu'il ne protège pas aussi bien que le plomb et, une fois qu'un mur de béton a été coulé à un certain endroit, il n'est pas facile de le déplacer. En ce qui concerne les appareils portatifs, le béton est hors de question, à cause de l'encombrement. Le tableau suivant donne quelques-unes des constantes les plus importantes.

**Tableau 11. Constantes pour le béton**

| | |
|---|---|
| Masse volumique | 147 lb/pi$^3$ |
| $\mu$ (1,25 MeV) | 0,13-$^1$ |
| Point de fusion | très élevé |
| CDA (Co 60) | 6,858 cm |
| CDA (Rayons X, 400 kVc) | 3,302 cm |
| CDA (Rayons X, 350 kVc) | 2,794 cm |
| CDA (Rayons X, 100 kVc) | 1,778 cm |

C. Fer et acier

Ces deux matériaux sont utilisés dans certaines circonstances. Ils sont un peu plus efficaces que le béton, mais pas autant que le plomb. Ils sont peu malléables et généralement trop coûteux pour le degré de protection obtenu.

**Tableau 12. Constantes pour le fer et l'acier**

| | |
|---|---|
| Masse volumique | 7,8 g/cm$^3$ |
| $\mu$ (1,25 MeV) | 0,4 cm$^{-1}$ |
| Point de fusion | 2800°F |
| CDA (Co 60) | 2,209 cm |
| CDA (Rayons X, 400 kVc) | 2,54 cm |
| CDA (Rayons X, 250 kVc) | 0,939 cm |
| CDA (Rayons X, 100 kVc) | 0,254 cm |

D. Uranium appauvri

Ces dernières années, on a découvert que l'uranium appauvri pouvait être utilisé comme matériau protecteur. Son numéro atomique étant plus élevé que celui du plomb, il absorbe mieux les rayons X et les rayons gamma. La masse volumique de l'uranium est de 19,06 g/cm$^3$ et son point de fusion est de 2070°F.

E. Les verres au plomb

Comme le nom l'indique, ces verres contiennent des sels de plomb. On les trouve dans le commerce avec différentes masses volumiques. Les propriétés protectrices de quelques verres au plomb sont données dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 13. Propriétés protectrices des verres au plomb**

| |
|---|
| 2,54 cm (1 pouce) de verre de densité élevée (6,2) équivalent à:<br>1,397 cm de plomb<br>2,54 cm d'acier<br>7,112 cm de béton |
| 2,54 cm (1 pouce) de verre de densité moyenne (3,8) équivalent à:<br>0,863 cm de plomb<br>1,371 cm d'acier<br>4,318 cm de béton |
| 2,54 cm (1 pouce) de verre de faible densité (3,0) équivalent à:<br>0,660 cm de plomb<br>1,066 cm d'acier<br>3,302 cm de béton |

Les verres au plomb coûtent très cher et ils ne sont utilisés que lorsqu'il est essentiel que le matériau soit transparent.

15.4 Configurations des écrans de protection

Comme on l'a vu précédemment, les propriétés protectrices des différents écrans varient selon le type de rayonnement. Afin de bénéficier au maximum du dispositif de protection utilisé, il faut comprendre les mécanismes d'atténuation ainsi que les avantages et les inconvénients du type d'écran employé.

Dans la conception d'installations radiologiques importantes, il faut toujours essayer de combiner distance et écrans pour obtenir la configuration la plus économique.

Les grandes pièces où seuls les murs sont blindés (pas le plafond) doivent être situées de telle sorte que tout rayonnement diffusé par le plafond ou par l'appareillage situé au-dessus du dispositif n'atteigne pas des zones occupées. On peut réduire la diffusion en recouvrant le plafond de plomb ou en concentrant le faisceau principal à l'aide d'un collimateur.

## 15.5 Contrôle des rayonnements

### 15.5.1 Introduction

Le contrôle des rayonnements porte sur tout ce qui contribue à la dose reçue par le patient: rayonnement direct, rayonnement diffusé et rayonnement de fuite dans le dispositif à rayons X. Il concerne aussi le rayonnement diffusé par le patient et tout faisceau primaire parasite qui présente un danger pour le personnel et la population en général, et qui nuit à la qualité de l'image utilisée pour le diagnostic.

Un contrôle complet doit être effectué par un physicien expérimenté dans ce domaine. Le radiologue et les radiotechniciens doivent lui exposer leurs méthodes de travail de façon à ce qu'il puisse faire des recommandations qui entraîneront un minimum de modifications dans le fonctionnement du service.

### 15.5.2 Surveillance individuelle

La surveillance individuelle, si elle est régulière, fournit une grande partie des renseignements nécessaires pour le contrôle. Cependant, cette méthode comporte certaines limitations. La surveillance individuelle est abordée dans le Chapitre 14.

### 15.5.3 Surveillance de zone

Pour la surveillance de zone, on utilise différents types d'instruments de contrôle. Les plus sûrs sont ceux du type "chambre d'ionisation", s'ils ont été étalonnés correctement pour l'énergie du rayonnement à mesurer. En pratique, on mesure les débits de dose et, en utilisant des facteurs de correction appropriés, on évalue le danger potentiel en n'importe quel point.

### 15.5.4 Surveillance en des points fixes

On peut fixer des dosimètres photographiques ou des chambres d'ionisation de poche sur les murs, les portes, les écrans protecteurs, etc., afin de déterminer les expositions potentielles en ces points. Ces méthodes permettent une évaluation assez précise du débit de dose pendant de longues périodes. Les moniteurs sont placés dans

le champ de rayonnement, dans des conditions de travail réelles, et il n'est pas nécessaire de faire intervenir des valeurs hypothétiques comme les paramètres "d'utilisation" et de "charge de travail". Pour que les résultats soient représentatifs des conditions réelles de travail, il faut que les moniteurs soient laissés en place assez longtemps.

15.5.5 Instruments de contrôle

Du point de vue de leur fonctionnement, les appareils de contrôle sont semblables aux autres instruments de radiodétection. Un bon appareil de contrôle doit être portatif, robuste, sensible, fiable et de construction simple. Aucun instrument ne réunit toutes ces qualités, mais il en existe beaucoup qui présentent la plupart d'entre elles.

Instruments de mesure des rayonnements X et gamma

On doit étalonner les instruments de contrôle utilisés pour mesurer avec précision les rayonnements X et gamma afin de déterminer:

(i) la dépendance énergétique;
(ii) les effets directionnels;
(iii) la précision de l'échelle;
(iv) la dépendance débitmétrique.

C'est pour des énergies inférieures à 100 ou 300 KeV que la dépendance énergétique de ces instruments est généralement la plus critique.

Les instruments sont conçus par les fabricants pour donner une lecture directement en unités de rayonnement. Cependant, pour les raisons énoncées précédemment, comme certaines caractéristiques individuelles entraînent des variations dans la réponse de l'instrument, il est nécessaire d'étalonner chaque instrument en fonction de l'utilisation prévue, si l'on veut que les lectures soient précises.

15.5.6 Rapport de contrôle

Les résultats et les conséquences du contrôle doivent être examinés avec le chef de service et avec le responsable de la radioprotection.

On trouvera en annexe un exemple d'un rapport de contrôle.

## GLOSSAIRE TECHNIQUE

**Absorption:** Processus par lequel un rayonnement transfère son énergie à la matière.

**Activité:** Taux de désintégration des atomes.

**Annihilation:** Se produit quand une particule et une antiparticule se rencontrent et s'annulent. Avec un positon et un électron, on obtient deux photons de 0,51 MeV.

**Atténuation:** Réduction du champ de rayonnement.

**Béquerel:** Unité d'activité dans le SI = 1 désintégration par seconde.

**Cancérigène:** Susceptible de provoquer le cancer.

**Chambre d'ionisation:** Appareil en gros identique à un tube compteur Geiger, utilisé pour mesurer la radioactivité.

**Chromosome:** Élément du noyau de la cellule, en forme de bâtonnet, contenant les gènes.

**CIPR:** Commission internationale de protection radiologique.

**Contamination:** Dispersion indésirable de substances radioactives.

**Couche d'atténuation au dixième:** Épaisseur d'un matériau absorbant spécifique qui réduit l'intensité au dixième de sa valeur initiale.

**Couche de demi-absorption:** Épaisseur d'une substance absorbante déterminée qui réduit l'effet du rayonnement de 50% de sa valeur.

**Curie:** Ancienne unité d'activité = $3,7 \times 10^{10}$ désintégrations par seconde.

**Débit de dose:** Dose absorbée pendant une unité de temps.

**Décontamination:** Élimination ou réduction de la contamination radioactive par nettoyage des locaux ou des objets.

**Descendant:** en radioactivité, désigne le noyau ou l'atome produit par la désintégration du père nucléaire.

**Désintégration:** Transformation nucléaire spontanée qui peut entraîner l'émission de rayonnements alpha, bêta ou gamma.

**Dose absorbée:** Quantité d'énergie transmise par rayonnement à l'unité de masse d'un tissu.

**Dosimètre:** Instrument permettant de mesurer la dose absorbée par une personne.

**Écran protecteur (blindage):** Matériau placé entre une source de rayonnement et l'objet irradié, et destiné à réduire le rayonnement.

**Effet Compton:** Interaction d'un photon gamma avec un électron orbital avec production d'un rayon gamma secondaire et d'un électron.

**Électron:** Plus petite charge électrique. Particule, constituant de l'atome, située en périphérie.

**Électron-volt:** Unité d'énergie égale à la variation d'énergie d'un électron soumis à une variation de potentiel d'un volt (eV).

**Équivalent de dose:** Mesure de l'effet biologique d'un rayonnement = dose absorbée x facteur de qualité (Sievert).

**Érythème:** Rougeur de la peau causée par un accroissement de la circulation sanguine locale en réaction à une lésion tissulaire.

**Étalonnage:** Vérification des écarts de lecture entre un appareil et un instrument étalon dans le but d'obtenir les facteurs de correction nécessaires.

**État excité:** État temporaire d'un noyau, d'un atome ou d'une molécule, dont l'énergie potentielle est supérieure à celle de l'état fondamental. État intermédiaire entre l'état stable normal et la désintégration complète, l'ionisation ou la décomposition.

**Exposition:** Mesure de la quantité de rayonnement ionisant présent.

**Exposition chronique:** Irradiation pendant une longue période.

**Facteur de qualité:** Efficacité biologique nominale d'un rayonnement, fixé par règlement. Sa valeur est de 1 pour les rayonnements bêta, gamma et X; elle est de 20 pour les rayons alpha.

**Filtre:** Écran de métal placé entre le patient et la source de rayons X pour absorber une certaine partie du faisceau.

**Fission:** Division d'un noyau en au moins deux noyaux plus légers (produits de fission). Peut être spontanée ou induite.

**Fluorescence:** Émission de lumière visible par un cristal après absorption d'énergie.

**Gray (Gy):** Unité de dose absorbée dans le SI = J/kg.

**Ion:** Atome ou molécule chargé électriquement.

**Ionisation:** Processus au cours duquel un ou plusieurs électrons sont arrachés à un atome neutre.

**Isotopes:** Atomes du même élément qui ont la même charge, mais des masses différentes.

**Kilovolt:** Unité équivalente à 1000 volts utilisée pour la mesure de l'énergie des rayons X.

**Kilovolt crête:** Tension maximale, en kilovolts, appliquée à un tube rayons X.

**Masse atomique:** Nombre approximativement égal à la somme des nombres de protons et de neutrons dans le noyau d'un atome (A).

**Mutation:** Transformation d'un gène provoquée par un rayonnement ou par d'autres agents et modifiant les caractères héréditaires.

**Neutrino:** Particule neutre, légère, émise lors d'une désintégration bêta.

**Neutron:** Particule nucléaire élémentaire, électriquement neutre, dont la masse est proche de celle du proton.

**Nombre de masse:** Nombre total de protons et de neutrons dans le noyau d'un atome.

**Noyau:** Partie centrale de l'atome.

**Nucléide:** Atome caractérisé par son numéro atomique et son nombre de masse.

**Numéro atomique:** Nombre de protons dans le noyau d'un atome (Z).

**Particules alpha:** Elles sont souvent appelées rayons alpha. Noyaux d'hélium chargés positivement.

**Particules bêta:** Elles sont souvent appelées rayons bêta. Électrons libres éjectés de l'atome lors de la désintégration radioactive.

**Père:** Noyau radioactif qui se désintègre pour former une substance radioactive (descendant).

**Période radioactive:** Temps nécessaire pour que l'activité diminue jusqu'à la moitié de sa valeur.

**Photoélectron:** Électron qui absorbe complètement un photon de grande énergie et qui acquiert ainsi suffisamment d'énergie pour être arraché de l'atome.

**Photon:** Quantum de rayonnement électromagnétique.

**Positon:** Particule de masse identique à celle de l'électron et de charge électrique égale, mais opposée.

**Production de paires:** Transformation d'un photon gamma en une paire de particules, un électron et un positon.

**Proton:** Particule nucléaire élémentaire, chargée positivement.

**Quantum:** Synonyme de photon.

**Rad:** Ancienne unité de dose = 100 erg/g.

**Radioactivité:** Phénomène au cours duquel des atomes se désintègrent avec émission de rayonnements.

**Radioscope:** Écran fluorescent installé en face d'un tube à rayons X. Permet l'examen visuel des organes.

**Radio-isotopes:** Isotope radioactif d'un élément. Synonyme de radionucléide.

**Rayonnement de fond:** Terme utilisé pour décrire la radioactivité (ou le rayonnement) naturelle.

**Rayonnement de freinage:** Rayonnement X produit lorsque des électrons sont brusquement ralentis.

**Rayonnement ionisant:** Rayonnement électromagnétique (X ou gamma) ou corpusculaire (alpha, bêta, neutrons, etc.) qui produit des ions lors de son passage à travers la matière.

**Rayons cosmiques:** Rayonnement de grande énergie provenant de l'espace, faisant partie du rayonnement naturel.

**Rayons gamma:** Rayonnement électromagnétique émis par le noyau d'un atome pendant la désintégration radioactive.

**Rayons X:** Rayonnement électromagnétique de grande énergie émis lorsque des électrons changent de niveaux d'énergie à l'intérieur d'un atome ou lorsqu'ils sont brusquement freinés.

**Rem:** Ancienne unité d'équivalent de dose = rad x facteur de qualité.

**Roentgen:** Unité d'exposition définie par l'ionisation produite dans des conditions spécifiques.

**Si:** Système international. Unités métriques faisant l'objet d'un accord international.

**Sievert (Sv):** Unité d'équivalent de dose dans le SI = Gy x facteur de qualité.

**Somatique:** Qui concerne tous les tissus biologiques, sauf les cellules reproductives.

**Source:** Toute substance ou objet qui émet un rayonnement.

**Surexposition:** Exposition au rayonnement excédant des limites spécifiées.

**Surveillance:** Contrôle du niveau de rayonnement dans une zone donnée dans le but d'évaluer les dangers potentiels.

**Temps de latence:** Intervalle de temps entre une irradiation et l'apparition d'un effet biologique qui en découle.

**Tube compteur:** Instrument répondant au passage d'un rayonnement nucléaire grâce à une amplification électronique.

**Ultraviolet:** Rayonnement électromagnétique dont l'énergie est supérieure à celle de la lumière visible (plus grande fréquence), mais insuffisante pour provoquer l'ionisation.

# RAPPORT DE CONTRÔLE

Renseignements généraux:

Institution: Hôpital général
Contrôleur: Monsieur Untel
Date de contrôle: 27 mai 1964

Installation:

Lieu: Salle N° 3 - Service de radiologie
Marque et modèle: Picker-Pictronic 300
Type de générateur: Monophasé, redressé à deux alternances
Type de dispositif: Combiné radiographie-radioscopie

Tubes à rayons X:

1. Radiographie-Dynamax 25
   a) Enceinte pour tube à diagnostic.
   b) Muni d'un collimateur.
   c) Filtration totale équivalente à 3 mm d'Al.
2. Radioscopie-Dynamax 26
   a) Enceinte pour tube à diagnostic.
   b) Muni d'obturateurs fonctionnant sans à-coups.
   c) Filtration équivalente à 3 mm d'Al.
   d) 45 centimètres entre le foyer et le bloc de commande ou la table de traitement.

Remarques:

L'équipement dans cette salle ne présente aucun défaut majeur. Les points suivants sont à corriger:

1. la longueur du fil de l'interrupteur d'irradiation est de 1,82 mètre, ce qui permet à l'opérateur de travailler en dehors de la zone protégée.
2. Les filtres additionnels pour le tube de radiographie s'enlèvent facilement.
3. Le joint entre le collimateur et l'enceinte du tube de radiographie n'offre pas la même protection que l'enceinte.

4. Les portes de la salle ne sont pas tapissées de plomb.

5. Il n'y a rien pour recouvrir les grilles mobiles pendant la radioscopie.

Recommandations:

1. Aviser les opérateurs de ne pas quitter la zone protégée pendant une irradiation.

2. Installer les filtres additionnels devant le tube radiographique de telle sorte qu'ils ne puissent être enlevés sans outil.

3. Tapisser les portes de plomb si l'on envisage d'augmenter la charge de travail actuelle.

**Tableau 1. Faisceau direct**

| Tube | kVc | mA | *DCC | rem/100 mA.s | rem/minute |
|---|---|---|---|---|---|
| Radiographique | 70 | 50 | 40" | 0,58 | - |
| Radiographique | 80 | 50 | 40" | 0,76 | - |
| Radiographique | 90 | 50 | 40" | 0,95 | - |
| Radiographique | 100 | 50 | 40" | 1,1 | - |
| Radioscopique | 90 | 3 | 18" | - | 3 |

*DCC Distance cible-chambre.

**Tableau 2. Rayonnement parasite**

**(Radiographie)**

| Lieu des mesures (Voir Figure 1) | Direction du faisceau | mrem/100 mA.s | Fantôme |
|---|---|---|---|
| 1. Cabine de commande à travers une vitre | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |
| 2. Cabine de commande, poste de l'opérateur | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |
| 3. Entrée de la cabine de commande | Vers le bas (centre de la table) | 0,3 | Oui |
| 4. Porte secondaire (fermée) | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |
| 5. Porte du couloir (fermée) | Vers le bas (centre de la table) | 0,4 | Oui |
| 6. Chambre noire | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |
| 7. Salle de tri | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |
| 8. Toilettes | Vers le bas (centre de la table) | 0,01 | Oui |

**Tableau 3. Rayonnement parasite**

**(Radiographie)**

| Lieu des mesures (Voir Figures 1, 2 et 3) | Direction du faisceau | mrem/h | Fantôme |
|---|---|---|---|
| 9. À travers le tablier | Vers le haut (centre de la table) | 25 | Oui |
| 10. Côté de la table | Vers le haut (centre de la table) | 250 | Oui |
| 11. Côté de la table | Vers le haut (centre de la table) | 200 | Oui |
| 12. Côté de la table | Vers le haut (centre de la table) | 100 | Oui |
| 13. Grille mobile | Vers le haut (centre de la table) | 10-500 | Oui |
| 14. À travers la porte du couloir | Vers le haut (centre de la table) | 20 | Oui |
| 15. Cabine de commande | Vers le haut (centre de la table) | Nul | Oui |
| 16. À travers le verre protecteur, sur l'écran de radioscopie | Vers le haut (centre de la table) | 85 | Non |
| 17. Côté du patient | Vers le haut (centre de la table) | 300 | Oui |
| 18. Au pied de l'opérateur | Vers le haut (centre de la table) | 100 | Oui |
| 19. Cabine de commande | À l'horizontale (vers le couloir) | Nul | Oui |

**Figure 1. Salle de radiologie Nº 3**

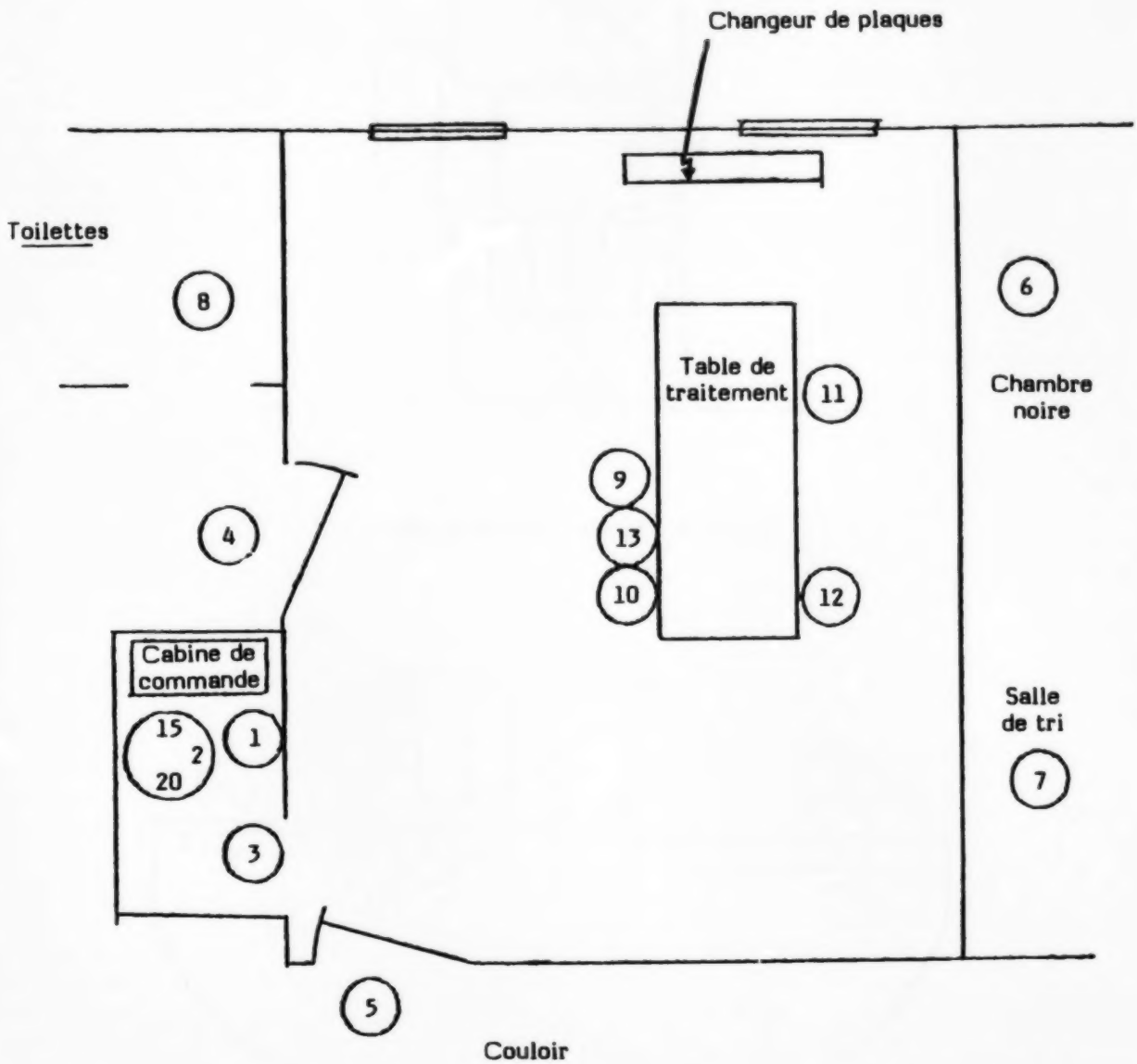
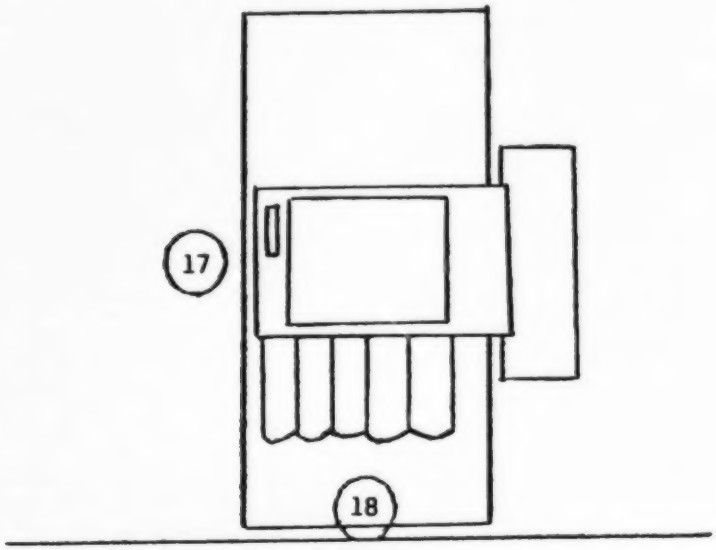


**Figure 2. Salle de radiologie N° 3 - Vue de la table à la verticale**



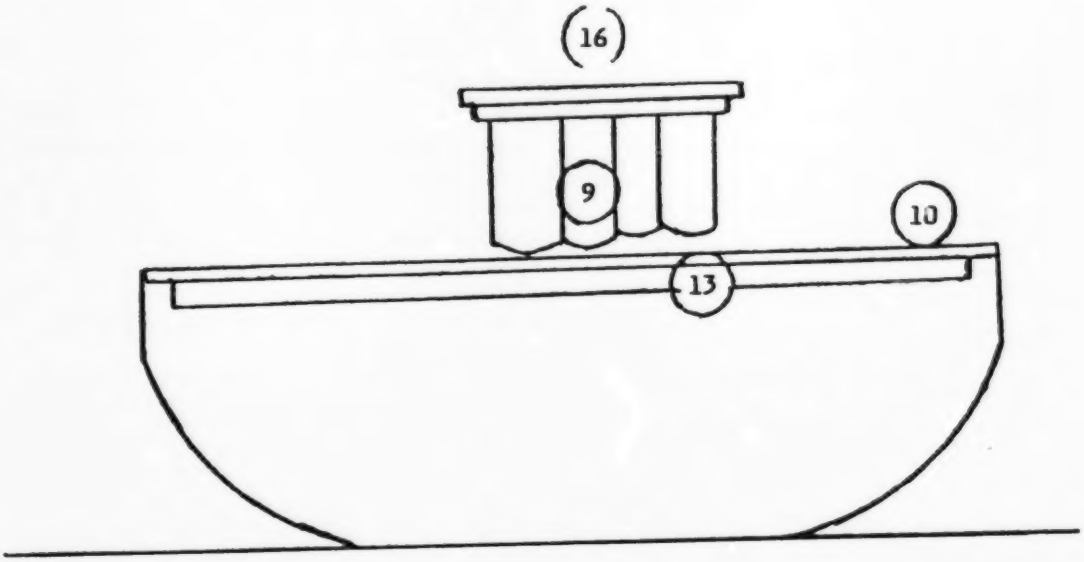


**Figure 3. Vue de côté de la table**